



TITLE:

# 電力紙ケーブルの構造に関する研究(Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

日下部, 悦二

---

CITATION:

日下部, 悦二. 電力紙ケーブルの構造に関する研究. 京都大学, 1962, 工学博士

ISSUE DATE:

1962-03-31

URL:

<https://doi.org/10.14989/161937>

RIGHT:

# 電力紙ケーブルの構造に関する研究

昭和34年

日下部悦二

# 電力紙ケーブルの構造に関する研究

昭和34年

日下部悦二

DOC

1961

33

電気系

# 電力紙ケーブルの構造に関する研究

日下部 悦二

## 概 要

電力紙ケーブルは最も安定したケーブルとして電力ケーブルの大部分を占める。特に30KV以上の範囲ではこれに代るべきものは全くない。

この電力紙ケーブルの機械的特性は電気特性に劣らず重要であり、電気的事故のほとんどは機械的要因によると云つて良い。電力紙ケーブルを研究した先人の多くは機械的特性の研究の重要なことを挙げてはいるが、これについての研究は非常に少い。

筆者はケーブルを長尺物構造物としてのパイプ構造とスパイラル構造の組合せであるとする新しい観点に立つて分類観察を行い、電力紙ケーブルの構造について総合的な研究を行つた。

当論文では各章とも実用上の問題をとらえ、主として実験によりこれに対する基礎的研究を行い、その結果に基づいて理論的考察を行つた。

これらにより従来基礎研究が未完成のため対策が立たず、あるいは対策を施しても理論的裏付けが不明のまま経験的に処理されることの多かつたこの分野において、基礎特性の把握、問題の原因究明をなし実用面に役立たせることができたものと思う。

特に絶縁層<sup>のて</sup>研究の発表は今迄余り見当たらないこの面の研究の糸口になるものと思う。また、機械的不安定の問題として取扱い研究を行つた。

なお、これらにおいてはケーブルを長尺物構造物としての新しい形式に分類し体系づけたが、このような考察方法は電力紙ケーブル以外のケーブルにも応用しうるものと思う。



## 目 次

第 1 章	電力紙ケーブル構造の概説	1
1.1	発達の歴史	1
1.2	構造上の特徴	5
1.3	構造上から見た機械的問題点	9
第 2 章	電力紙ケーブルに見られる円筒殻の曲げについて	14
2.1	等方性円筒の曲げ	14
2.1.1	緒言	14
2.1.2	各種材質円筒の軸方向圧縮挫屈	15
2.1.3	ケーブル被覆円筒の曲げ	22
2.1.4	ケーブル被覆円筒の曲げによる変形条件の向上について	30
2.1.5	結 言	32
2.2	異方性円筒の曲げ	33
2.2.1	緒言	33
2.2.2	絶縁層円筒	33
2.2.3	溝付鉛被	34
2.2.4	波付アルミ被	35
2.2.5	結 言	36
2.3	積層円筒の曲げ	37
2.3.1	緒言	37
2.3.2	生紙円筒の軸方向圧縮試験	38
2.3.3	乾紙円筒の軸方向圧縮試験	48
2.3.4	油浸紙円筒の軸方向圧縮試験	51

2.3.5	内部に心線のある場合の絶縁紙円筒の軸方向圧縮	58
2.3.6	ケーブル絶縁紙円筒の曲げ	61
2.3.7	ケーブル生紙絶縁層の曲げ挫屈特性の向上について	73
2.3.8	絶縁層の機械的一様性と電気特性との関係	79
2.3.9	結 言	80
第 3 章	電力紙ケーブルに見られる円筒殻の捩りについて	82
3.1	等方性円筒の捩り	82
3.1.1	緒 言	82
3.1.2	ケーブル被覆円筒の捩り	82
3.1.3	捩りと曲げの共存する場合について	86
3.1.4	結 言	88
3.2	異方性円筒の捩り	89
3.3	積層円筒の捩り	90
3.3.1	緒 言	90
3.3.2	生紙円筒の捩り試験	90
3.3.3	油浸紙円筒の捩り試験	99
3.3.4	内部心線を有する場合の絶縁層円筒の捩り	103
3.3.5	内部心線および外部被覆のある場合の絶縁層円筒の捩り	112
3.3.6	ケーブル絶縁層の捩り挫屈特性の向上について	119
3.3.7	積層構造絶縁層の将来性	120
3.3.8	結 言	121
第 4 章	電力紙ケーブルに見られる非円形断面筒殻について	122
4.1	緒 言	122
4.2	扇形筒殻の曲げ	123
4.3	扇形筒殻の捩り	127

4.4	結 言	135
㉞ 5 章	外圧を受ける電力紙ケーブル円筒殻の変形について	136
5.1	緒 言	136
5.2	空鉛筒の外圧による挫屈変形	136
5.3	単心電力紙ケーブルの外圧による変形	138
5.4	3心電力紙ケーブルの外圧による変形	140
5.5	結 言	145
㉞ 6 章	電力紙ケーブルに見られる固有応力挫屈	146
6.1	緒 言	146
6.2	湿気応力挫屈	146
6.3	膨潤により生ずる内部応力挫屈	148
6.4	熱応力挫屈	150
6.5	結 言	151
㉞ 7 章	電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造について	152
7.1	緒 言	152
7.2	電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造の種類	152
7.3	撚り加工の理論	154
7.4	結 言	166
㉞ 8 章	撚線スパイラルの特性について	167
8.1	ま え が き	167
8.2	撚線の曲げ特性	167
8.2.1	緒 言	167
8.2.2	撚線の可撓性の測定方法	168
8.2.3	撚線の曲げ剛性	178
8.2.4	結 言	186

8.3	撚線の撚り特性	187
8.3.1	緒言	187
8.3.2	撚線の撚り剛さ計算値	187
8.3.3	撚線の撚り剛さ測定	190
8.3.4	撚りにおける層間圧合および線間摩擦	193
8.3.5	撚線加工中の残留応力	199
8.3.6	扇形撚線の撚り特性	202
8.3.7	結言	204
8.4	特殊撚線の機械的特性	205
8.4.1	緒言	205
8.4.2	圧縮導体の特性	205
8.4.3	セグメンタル素線撚り導体の特性	211
8.4.4	結言	215
オ 9 章	電力紙ケーブルコアの機械的特性における各構成について	216
9.1	緒言	216
9.2	各構成の曲げ剛性	216
9.3	各構成の撚り特性	221
9.4	結言	223
オ 10 章	電力紙ケーブル絶縁層のスパイラルとしての性質について	225
10.1	緒言	225
10.2	絶縁層のスパイラルとしての性質	225
10.3	交互巻と同方向巻の比較	228
10.4	結言	230

オ 11 章	スパイラル構造の曲げによる素線移動に関する問題 について、	231
11.1	緒 言	231
11.2	スパイラル素線の曲げによる移動量	232
11.3	撚線スパイラルの曲げ戻しの問題	233
11.4	スパイラル素線の圧縮挫屈について	240
11.5	絶縁層の曲げ戻しの問題	241
11.6	結 言	243
オ 12 章	ケーブル外装に見られる金属スパイラルについて	245
オ 13 章	総 括	249
参 考 文 献		257

以 上

# 電力紙ケーブルの構造に関する研究

## 第1章 電力紙ケーブル構造の概説

### 1.1 発達の歴史

1879年炭素フィラメント白熱電球が *Thomas A. Edison* 氏により発明され、世界最初の配電線が、かれの考案した地下ケーブルによりニューヨーク市内に布設された。これが電力ケーブルの嚆矢である。

その後、*Callender* 氏、および *Franti* 氏による紙絶縁の研究や、*Francois Borel* 氏および *Siemens* 氏の被鉛の研究があり、1893年に至つて巾の狭い紙帯を巻き、乾燥后ロジン混和物を含浸して鉛被を施した今日のケーブルにきわめて近いものが、アメリカの *Norwich Wire Co.* で製造された。これが世界最初の可撓性を持つ紙絶縁電力ケーブルであつた。

20世紀に入り高電圧送電が始まるとともに、段絶縁の理論、誘電体損失の研究等も進み、ケーブル使用中の劣化機構も次第に明らかとなり、設計技術の面にも相ついで革新的な進歩を見るに至つた。

すなわち、オーには *M. Höchstädter* 氏によるHケーブルの発明である(1914)。従来多心ケーブルでは各線心絶縁の上に共通なベルト絶縁を施したベルトケーブルを使用してきた。このケーブルは電気的には、電界の方向、強さが各サイクルごとに変り、誘電体内において回転するため、正切ストレスを受け、これが絶縁耐力に悪影響を与えることになる。さらに構造上の欠点として、

1. ケーブル中心部および線心とベルト紙層間にジュート、紙紐からなる介

在物を有する。

2. ベルト絶縁層は歪が大きく敷がしやすい。

3. 取扱中の曲げ、または負荷による熱膨張のため、線心が互に分離せんとする可能性がある。

等により絶縁内部に空隙（ボイド）を生じやすく、これがまたイオン化を起しケーブル破壊の原因となる。

Hケーブルは各線心に金属化紙を捲いて静電遮蔽を行い上記の欠点を除いたもので、類似のものに孔あき銅テープを使用するものもあり、高電圧での使用に耐えるケーブルとして20 KV級にも使用された。

オニの発明はほぼ同時代に出現したSLケーブルである。これは *Dunsheath* 氏により考案せられ、各線心にそれぞれ鉛被を施した後介在物とともに燃合せたもので、Hケーブルのベルトケーブルに対する利点はそのまゝ、SLケーブルにも当はまるが、さらにSLケーブルがHケーブルに比して構造上優る点を列挙すれば、つぎの如くである。

1. SLケーブルでは外歪大なる鉛被が避けられ屈曲時の鉛被歪が少くなる。

2. 各線心単独で乾燥浸油を行うので製造時における取扱いが容易である。従つて製造時余裕のあるドラム歪に巻きとつて工程を進めうる。

また燃合せは油入后行うので紙皺の発生等が少い。

3. Hケーブルは使用中の熱サイクルにおいて冷浸混和物が遮蔽帯を通して出入する虞れがあり、高低差の大きい場所では油が滴下しやすいが、SLケーブルはこの点Hケーブルよりも有利である。

このような利点を有するためわが国においても20～30 KV級の電圧にはほとんどSLケーブルが使用されている。

なお、*Höchstädter* 氏は単心ケーブルにも線心と鉛被間に金属化紙



を入れ鉛被下にできやすい真空隙を電界より除くことを考えた。この考えはSLケーブルの各線心や後に現われた単心O.F.ケーブルにも応用されている。

以上のHケーブルおよびSLケーブル(これらはベルトケーブルとともにソリッドケーブルと総称される)は安定したケーブルではあるが、さらに高電圧での使用に際しては難点がある。

すなわち、ソリッドケーブルでは製造中の残留気泡と、使用中における熱膨脹収縮による絶縁体の容積変化、ならびに鉛被の非弾性にもとづく絶縁体内および鉛被下の空隙発生がケーブル劣化の基となる。これらの空隙での電気的ストレスがある値以上となる時イオン化を起し、絶縁物の劣化を来して、遂には破壊に至る。

この要求により生れたものがO.F.ケーブル、G.F.ケーブルおよびパイプ型ケーブルに代表される圧力ケーブルである。

O.F.ケーブルは液態誘電体に常時大気圧以上の油圧を加え、負荷増減に伴う絶縁油の体積変化を外部給油槽で補償して、空隙の発生、イオン化の開始を阻止する。このケーブルは *Luigi Emanueli* 氏により発明され、1923年アメリカ *Cleveland* の 66 KV ケーブルおよび1924年イタリア *Milano* の 130 KV ケーブルの布設以来、広く各国で用いられ、超高压ケーブルにおける王者の地位を占めている。

この液態誘電体に圧力を加える考案は *David Brooks* 氏(1877) *J.F. Watson* 氏(1913)等により古くから考えられ、ついに *Emanueli* 氏に至って実現を見たものである。

G.F.ケーブルはO.F.ケーブルの圧力媒体を窒素ガスにかえ、充分なイオン化開始電圧を保持できる圧力を与えるもので、*C.J. Beaver* 氏(1933), *P. Dunsheath* 氏(1935)の考案を経て *Shanklin* 氏

(1939)による現行タイプ<sup>°</sup>のものが広く用いられるに到った。

さらに、ケーブルを鋼管内に收容することにより、上記油圧またはガス圧を  $15\text{Kg/cm}^2$  迄も高め、ケーブル特性の安定化を計ったパイプ型オイル(またはガス)フィールドケーブルも 1933 年頃より広く用いられている。

また、被覆を有するソリッド、ケーブルコアを鋼管内に収めた后ガスまたは油を充填し、被覆外部より高圧力を加えて絶縁体内のボイドを消滅させ、イオン化を阻止したパイプ型コンプレッションケーブルも同時代から用いられ、同様急激な発展を見ている。

以上の歴史に見られる如く種々の構造のものが相ついで現われ、それぞれの特徴を生かして使用されているが、これらの発展の過程はすべて絶縁体のボイド発生をいかにして阻止するかに終始して来たと云つて過言ではない。

このやうな考え方からは大体各種タイプが出盡した感があるが、これらにもまだ構造上および製作上の欠点は多い。

たとえば、OF ケーブルでは低粘度油使用のため、被鉛工程あるいは撚合工程を浸油前に行うので、うねり、紙皺、紙切れ、を発生する虞があり、特に単心ケーブルでは油通路存在のためケーブル径が大となり、絶縁体、鉛被に屈曲時損傷を受けやすい。

また、コンプレッション型ケーブルでは油膨脹を補償し不規則な絶縁体歪屈を防ぐため楕円形コアを採用しているので、円形コアに比し機械的特性が低い。

G.F. ケーブルにあつても S.L ケーブルと価格面で拮抗するためには、扇形をとる必要があり、同様円形ケーブルに比し機械的特性が劣る。

## 1.2. 構造上の特徴

電力を送るという電力ケーブル本来の使命から当然のことではあるが、ケーブル構造の特徴は導体、絶縁体、被覆の三者の組合せからなることと、長さが長いと云うことにあると思う。前者についてはそれぞれ古くから研究が行われているが、ここでは後者について考えて見たい。

製造上、布設上また、使用上の多くの特色はこの長いということから出発している。

すなわちケーブルは、

1. 長尺物として扱いやすい構造を持つ。
2. 接続部を有する。
3. 過渡現象が起きやすい。

従って、この三点はケーブルが長いと云うことに基づく三大特徴と云うると思う。

この中、2については、ケーブルは何百米、時には何軒にも亘つて布設されるので、到底一条長として製造できない。このためケーブルには接続部が避けられず、これは往々にしてケーブルの弱点にもなるので、ケーブルと同等以上に研究が行われており、またそれが必要でもある。

3.は長いということから当然起りやすく、ケーブル絶縁厚さ、防蝕層厚さなどはケーブルの電氣的過渡現象により左右され、またこの電氣的過渡現象は同時に熱的過渡現象やその他の物理的過渡現象（OFケーブルの油圧変化、ガス圧ケーブルのガス圧変化、パイプ型コンプレッションケーブルの油圧変化等）をも伴う。これらの過渡現象も古くから多方面に亘つて研究されている。

ところで筆者の扱わんとする問題は 1. の長尺物として扱いやすい構造という点にある。

この扱いやすいという意味は長尺物製造の容易、荷造発送の容易、布設、使用の容易等を包含するもので、ケーブルはこれらに適した構造を持つ如く発達して来ているはずであり、またこれに適する如く発達するであろう。

この事はケーブルの発送形式一つを取つて見ても、糸の如く細い線から外径 10 cm を越えるような太物海底ケーブルに至る迄すべて同じコイル捲形式をもつことでも分る。

いま長尺物工業製品を大別すれば

1. 棒状（線状）のもの ----- 針金等。非円形断面のものとしてはレールやアングル等がある。
2. テープ状のもの ----- 布テープ、金属テープ等。
3. 管状のもの ----- ゴム管、ガス管、水道管等
4. 螺旋状のもの（およびその集合） ----- 螺旋管、コイル、糸、巻綱、ワイヤーロープ等。
5. 鎖状のもの ----- 鎖、チェーン等。

に分類出来る。

このうち5の鎖状のものは使いやすいものではあるが、長尺物として製造しやすいものではなく、またケーブルの使用目的からも、もちろん適當ではない。2のテープ状のものはケーブル構成材料には多く用いられるが、ケーブル自体の構造としては電力を送るという目的から不適當である。1の棒状構造のうち、非円形断面のものは扱いやすい構造とは云えない。また、円形断面の棒状構造は管状構造および螺旋状構造の一種と云うことができる。

従つて、ケーブル構造はその目的からも、管状（パイプ）構造および螺旋状（スパイラル）構造から成り、かつ全体として棒状構造を示すことになる。

ケーブルは断面からも分るように比較的簡単な構造ではあるが、この如くスパイラル構造、パイプ構造の組合せから成つていて、長尺物工業製品のな

かでは最も複雑な構造であり、その品種も 3000 種類にも及んでいる。

また、このスパイラル構造は、棒状または帯状材料で構成される。

いま例を OF ケーブルに取ればオノ図に見る如く、次のような構造からなる。

油通路 ----- スパイラルにより形成される。スパイラルは金属テープからなる。

導 体 ----- スパイラルの集合である撚線。各素線は銅線からなる。

絶縁体 ----- スパイラル状に何枚もの紙テープを纏巻してなる。

また、絶縁層全体は油浸紙からなるパイプでもある。

3心合せ ----- 3心ケーブルでは上記コアをさらにスパイラル状に撚合せる。

被 覆 ----- 鉛パイプ

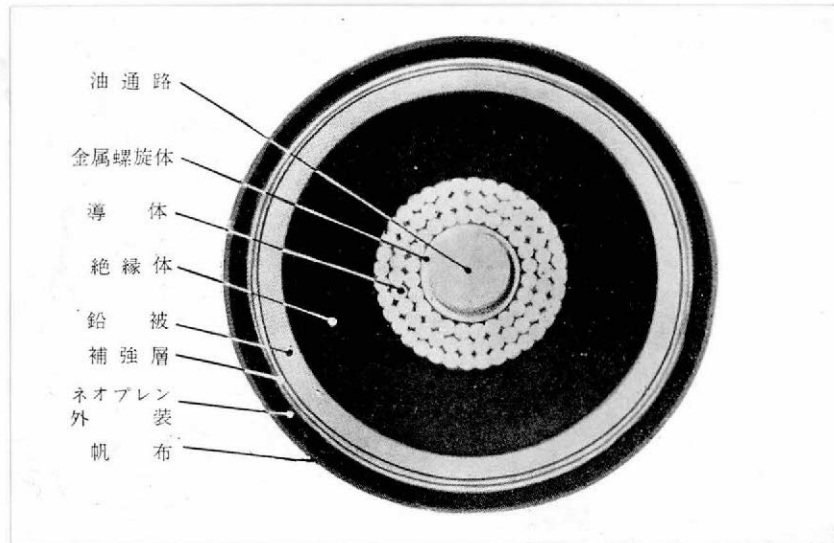
補強層 ----- 金属テープのスパイラル構造。

防蝕層 ----- ネオプレンゴム、PVC 等のパイプ。

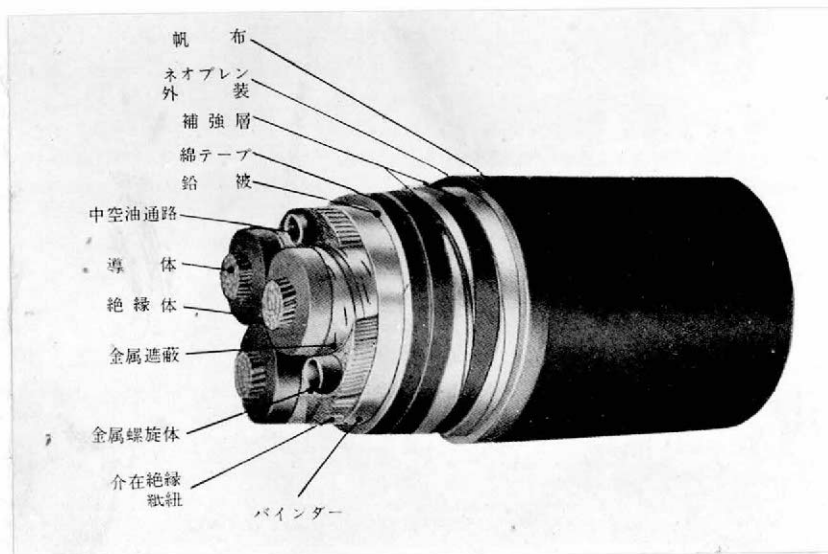
ネオプレンゴムの時はネオプレンゴムテープをスパイラル状に纏巻し、加硫后ネオプレンゴムパイプとなる。

オノ図 OFケーブルの構造

(a) 単心ケーブル

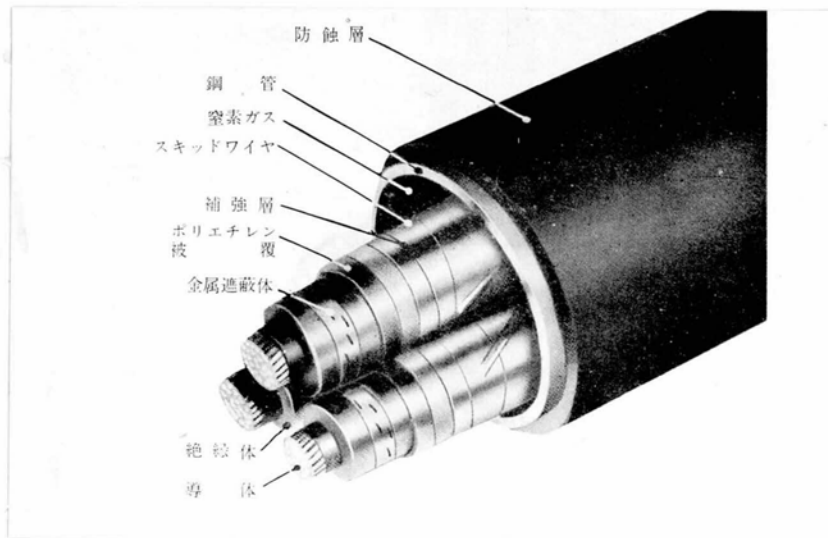


(b) 3心ケーブル



なお、新しい型のケーブルとして二、三年前から国内にも実用化されて来たパイプ型ケーブルはケーブルコアーを鉄パイプに収めて使用するが、どこまでもスパイラルおよびパイプと関係がある。(オノ図)

オ 2 図 パイプ型 ケーブルの構造



従つて、ケーブル製造機械も、パイプ関係機械（被鉛機、プラスチック押出機等）と、スパイラル関係機械（撚線機、紙巻機、撚合機、装盤機等）が主体となつている。（オ 3 図 ～ オ 6 図）

電力紙ケーブルのパイプ構造では、炭肉パイプ、厚肉パイプ、円形断面パイプ、非円形断面パイプ、等方性パイプ、直交異方性パイプ、積層パイプ等、他の工業製品に見られぬ多くのパイプ種類を含み、またパイプ材質も金属、ゴム、プラスチック、紙等多種多様であり、極めてめずらしい存在であると思う。

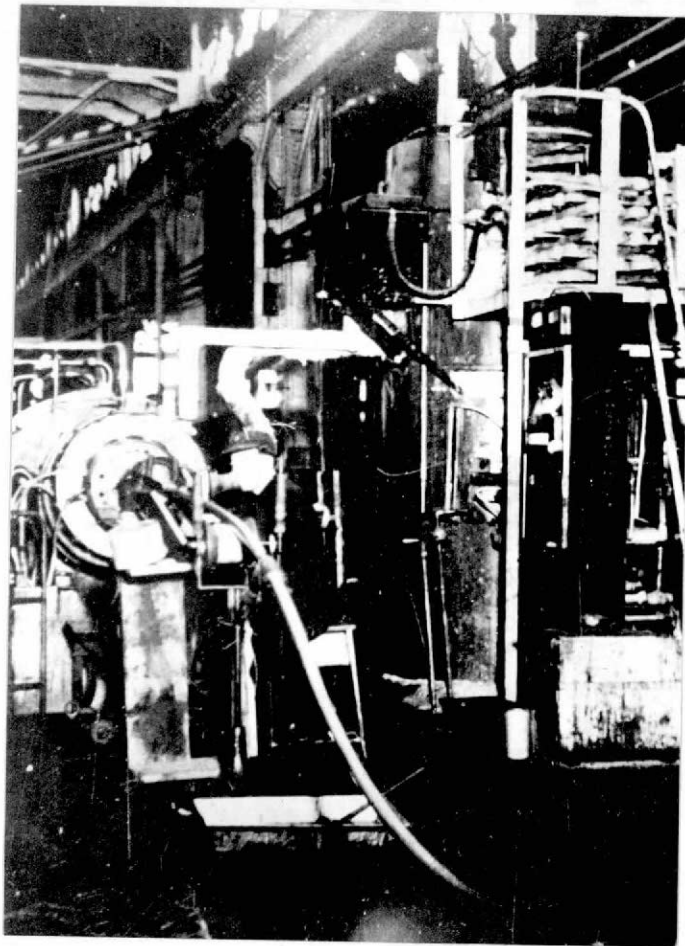
また、スパイラル構造でも糸、ジュート、紙の如き細いものの纏巻から鉄線装盤、ケーブルコアの撚合せの如き太いものの撚合せに至る迄あり、これもまた多種多彩である。

### 1.3. 構造上から見た機械的問題点

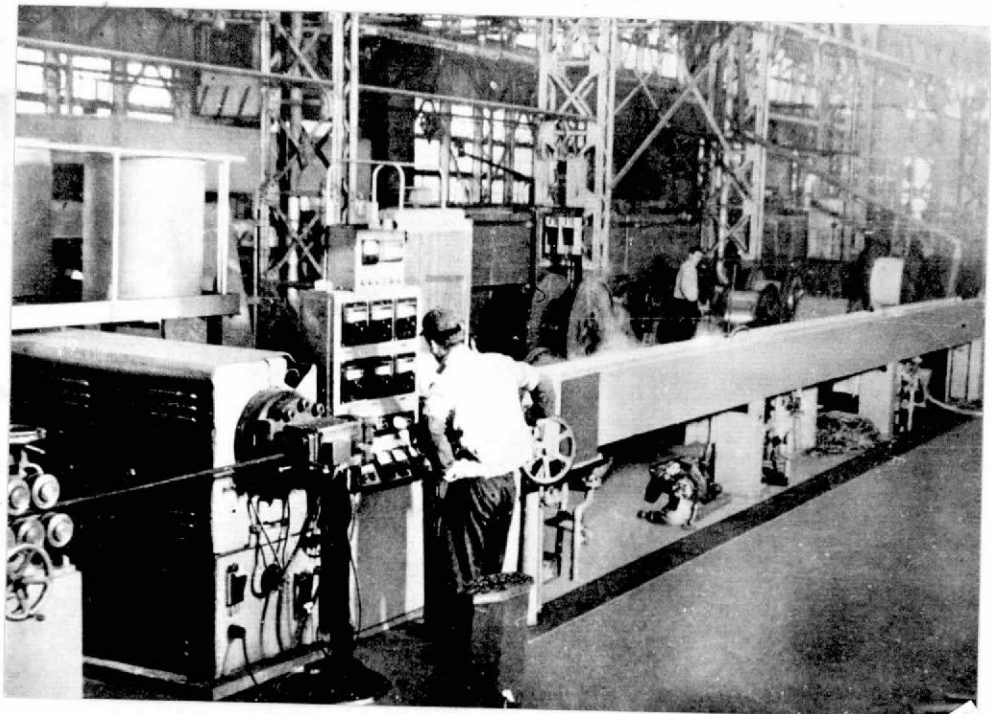
電力ケーブルの事故は機械的な損傷が大部分であり、電気的事故もほとんど機械的要因による。また、ケーブルが電気撚巻等にくらべ *Over Insulation* であるのは、長いことに基づく機械的な取扱上の不安定に対するためである。



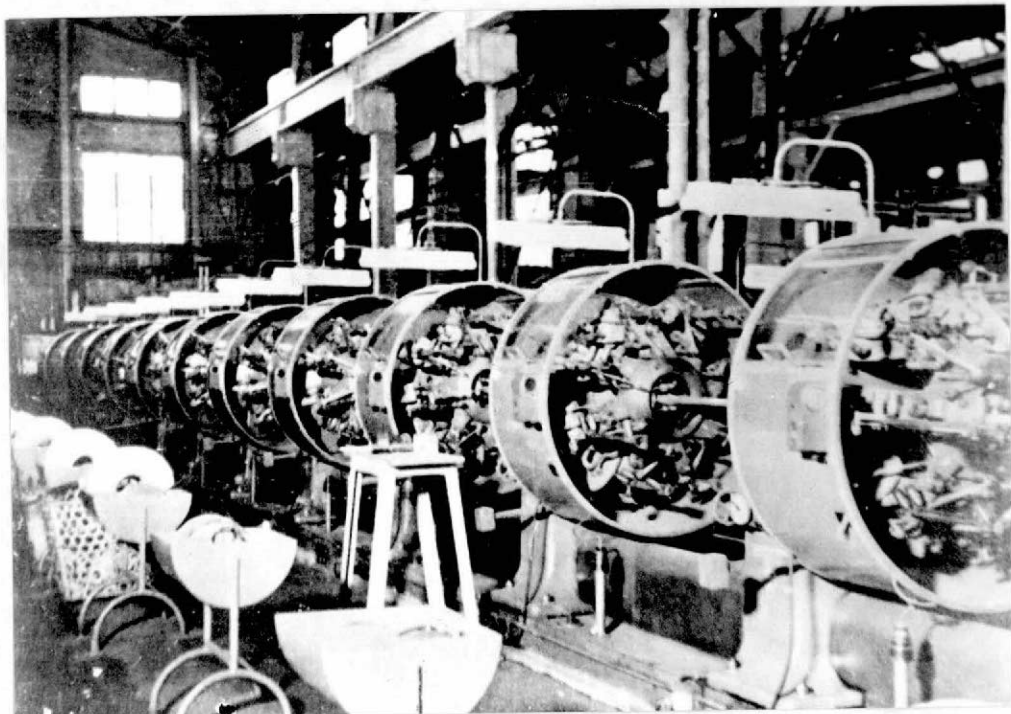
才 3 図    パイプ関係機械の例（その 1）  
            絞   鉛   機



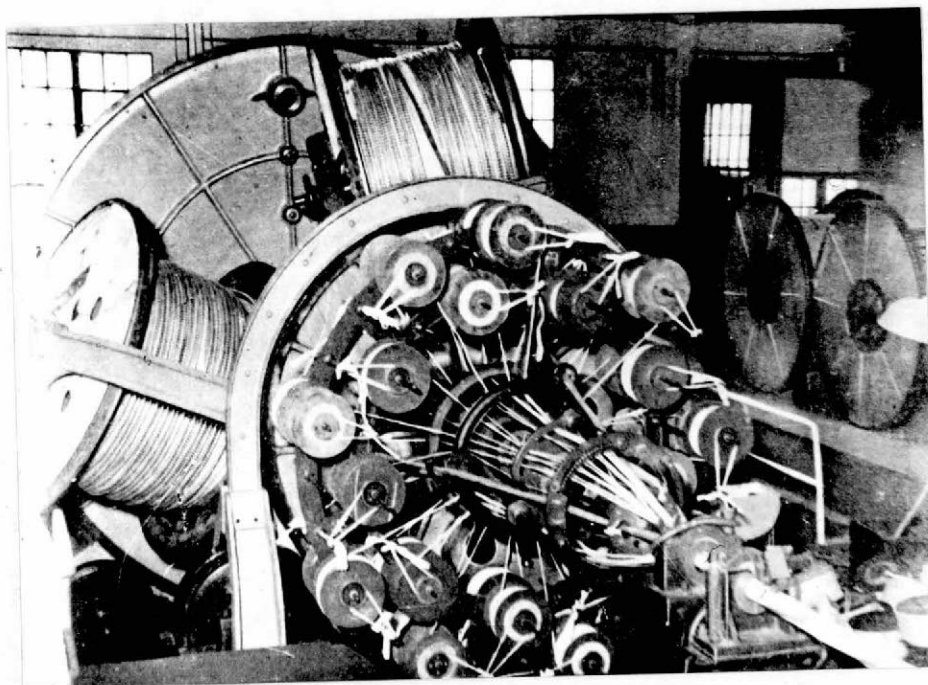
才 4 図    パイプ関係機械の例（その 2）  
            プラスチック押出機



オ 5 図 スパイラル関係機械の例 (その 1)  
紙 捲 機



オ 6 図 スパイラル関係機械の例 (その 2)  
撚 合 機



しかるに、ケーブルの機械的特性は、一部のものについて~~は~~研究されているが、構造そのものに關する研究は余り行われていない。

ケーブルは前節に述べた如く、長尺物として扱いやすいスパイラル構造およびパイプ構造の組合せから成つてゐる。したがつて、筆者はケーブルの機械的性質はこれらスパイラル、パイプの基本性質を研究し、この組合せとしての新しい立場から検討すべきであると考えて研究を進めた。

ケーブルは長尺物であるので、製造時および布設時コイル状に捲取することは不可避である。従つて必ず曲げおよび捩りを受ける。また製造上、布設上しばしば、圧縮、引張り、外圧、内圧を受ける。

パイプ構造は断面の直交方向寸法が長さ方向の寸法に比して著しく小さい。その上ケーブルでは、パイプの肉厚は可能な限り小さいことが望ましいので、前記の外力を受けた場合断面の直交方向への変位が大きくなりやすい傾向があり、自然挫屈等の不安定問題を生じやすい。

また、スパイラル構造は当然それ自体、異方性であり、内部応力によりうねりが生じやすく、また外力を受けた場合にも荷重形式と直接変形様式との關係が複雑で、撚線や鉄線鎧装のキンクの如く、生じた捩り荷重により曲げ挫屈を起すといふようなこともある。

ケーブルはこのような両構造の組合せであるから、単なるパイプおよびスパイラルの性質のみならず、組合せたものとしての性質をも研究する必要がある。

たとえば、スパイラルは曲げ、または捩りを受けた場合、そのスパイラル方向に移動するので、その移動により内外のスパイラル構造またはパイプ構造に影響を与え、かつまた、スパイラル構造自体も内外構造物に影響される。

曲げに際しての絶縁層の損傷が撚線導体により影響され、また撚線により発生するケーブルのうねりが外部絶縁層により影響されるなどはこの例である。

またパイプ構造は、内外のスパイラル構造またはパイプ構造の存在により  
挫屈限界を高めたり、挫屈様式を一変させることもある。

鉛被や油浸絶縁層の曲げ挫屈特性が内部構造物の存在により向上し、ま  
た油浸絶縁層の折り挫屈において、内部燃線の存在により挫屈形式が変り、そ  
の挫屈限界が向上したり、鉛被の存在により紙切が発生するなどはこの例で  
ある。

このようにケーブルのパイプ構造、スパイラル構造の組合せは複雑であり、  
受ける外力も多岐にわたるので、取扱う範囲を電力紙ケーブルの通電使用に  
至る迄の問題に限って考察を進めることとする。

なお、本論文においては各章とも実用上の問題をとらへ、実験によりこれ  
に対する基礎的研究を行い、その結果に基づいて理論的考察をなし、実用面  
に利用することを目的とした。

第二章より第六章迄は主としてケーブルを構成するパイプ構造について、  
第七章以降は主としてスパイラル構造について述べることとする。

## 第2章 電力紙ケーブルに見られる円筒殻の曲げについて

### 2.1 等方性円筒の曲げ

#### 2.1.1 結 言

電力ケーブルに見られる等方性円筒には、鉛、アルミ等の被覆と、ゴム、PVC等からなる防蝕層がある。いずれもパイプとしての性質をもち曲げにより挫屈を起す可能性がある。しかしゴム、PVCからなる円筒は厚肉であること、曲げを受けた場合扁平化による屈服挫屈を起すが内部に固い物質を有すること、また材質が大きな圧縮歪にも耐え得、かつ元に戻した場合回復すること等から、皺として発達したりそれにより亀裂を起したりすることもなく、この曲げの問題によりケーブルの取扱いを制限されることはない。従つてこゝでは鉛、アルミ等の被覆層の曲げを主として考察する。

これ等被覆層が曲げにより問題を起すのは曲げ挫屈による皺の発生であり、これはその後の取扱い、および使用中の伸縮等により、被覆の亀裂破損に定発展する恐れがある。電力ケーブルにあつては被覆の亀裂は水分の侵入を招き、直接に絶縁特性の低下となつて、ケーブルの電気破壊を起す。また、ケーブル被覆層の皺は亀裂破損のもととなるほか、被覆絶縁層間に空隙を生ぜしめてイオン化発生の温床となる。

等方性円筒の曲げの研究はケーブル以外で古くから行われており、W. Flügge氏(1932) L. H. Donnell氏(1934)は理論および実験により、金属円筒殻の弾性域挫屈において、その曲げによる挫屈応力が軸方向圧縮の挫屈応力に等しいと仮定して充分近似値を求めることが出来、かつ安全側に出ることを明らかにしている。<sup>(1)(2)</sup>

ケーブル被覆においては後述の如く塑性域が対象となるが、この考えを取り入れ、鈴木氏(1951)および F.O. Wallaston 氏、H.D. Short 氏(1953)は通信ケーブル被覆において、鉛およびアルミ円筒の軸方向の圧縮による挫屈限界から曲げによる皺発生限界を知り、これにより被覆厚決定の基準をうることを提案している。<sup>(3)(4)</sup>

従つて、こゝでも被覆の軸方向圧縮、曲げの順序で検討を加える。

筆者は従来の研究においては軸方向圧縮挫屈と曲げによる挫屈皺との関係の取扱いに混乱があると考えるので、本節ではこの関係について検討を加え、ケーブル被覆の曲げによる挫屈皺発生の問題を明らかにすることを主眼とした。

## 2.1.2 各種材質円筒の軸方向圧縮挫屈<sup>(2)(3)(7)(9)</sup>

円筒殻の軸方向圧縮挫屈については幸い、ケーブル以外で非常に古くから研究されており、1849年 W. Fairbairn 氏が実験を行つて以来多くの人々により繰返されて来た。

A. Robertson 氏の軟鋼、ニッケルクロム鋼の実験および E. E. Lundquist 氏のジュラルミンの実験等によれば、肉厚と半径の比  $\frac{t}{r}$  の充分に大きい円筒では材料の破壊強度で破壊し、この比の比較的大きな円筒では塑性域内で軸対称変形(外方変位)または非対称変形(内外同程度の変位のもの)の挫屈が起り、 $\frac{t}{r}$  の小さいものでは、弾性域において非対称変形(内方変位優勢のもの)が起る。<sup>(5)(6)</sup>

われわれの扱うケーブル被覆は  $\frac{t}{r} = 0.03$  以上の厚肉円筒であり、塑性域で挫屈を起すことが予想されるが、鉛管およびアルミ管の実験における応力—歪曲線からも当然のことながら塑性域挫屈であることが確認された。

オ7図、オ8図には鉛管を圧縮した場合の軸対称挫屈および非対称挫

图 7 塑性域对称挫屈

(周方向波数  $n=1$  材料 铅)

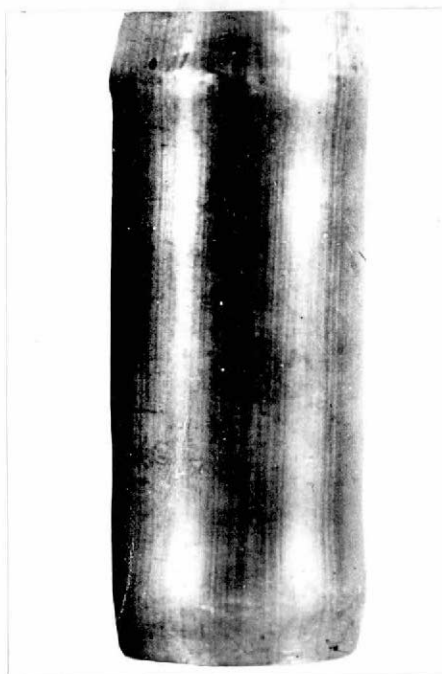
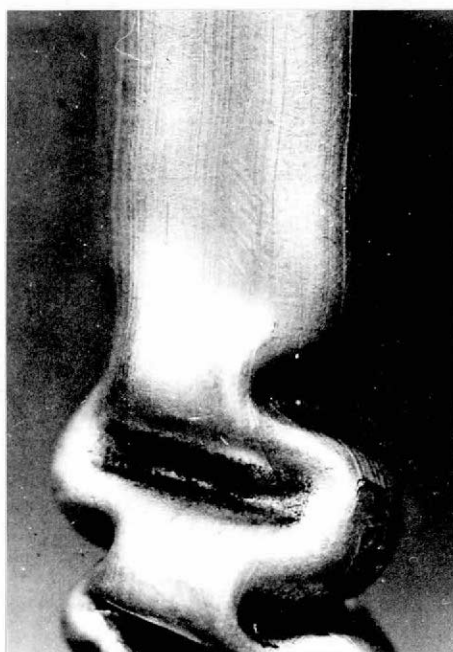


图 8 塑性域非对称挫屈

(周方向波数  $n=2$  材料 铅)





屈を示すが、これは前記 Robertson 氏および Lundquist 氏が確認した塑性域挫屈変形々式ともよく合っており、この変形様式からも塑性域挫屈であることが裏書きされる。

なお、オ8図の周方向波数  $n = 2$  の塑性域非対称挫屈は非常に珍しいもので、加熱衝真圧縮により作成したが、これは圧縮速度の大なることによると考える。筆者の実験によれば、鉛、アルミ等のケーブル被覆材料は、ケーブルに使用される範囲の肉厚および圧縮条件では、オ7図に示した対称挫屈のみを生じる。

この型の挫屈は塑性域に起るので、その解析は困難であり、今日迄充分解明されていない。これには J. W. Geckeler 氏 (1928) の次式を始め多くの提案があるが、<sup>(7)</sup> 実験値に合わず、また、外方変位のみを生ずることの説明も充分でない。

Geckeler 氏の式

$$\sigma_{cr} = \frac{\sqrt{E K}}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot \frac{h}{r}$$

ここに  $\sigma_{cr}$  : 挫屈応力  $h$  : 肉厚

$\nu$  : ポアソン比  $r$  : 平均半径

$E$  : ヤング率  $K$  : 等価ヤング率

$$K = \frac{4EE'}{(1E + 1E')^2}, \quad \begin{array}{l} E' \text{ は接線係数} \\ \text{(Tangent modulus)} \end{array}$$

鈴木氏は鉛においてこの型の軸方向圧縮挫屈を実験し、純鉛および更合金鉛が肉厚半径比  $\frac{h}{r}$  により、挫屈応力は異なつても挫屈歪は両者とも同一に整理できることを見出した。<sup>(8)</sup> (オ9図およびオ10図)

また、一般に比例限以上の挫屈では挫屈応力は低下することが確かめら

图9 屈服应力 -  $k/r$  特性

(○ 純鉛  
× 更合金鉛)

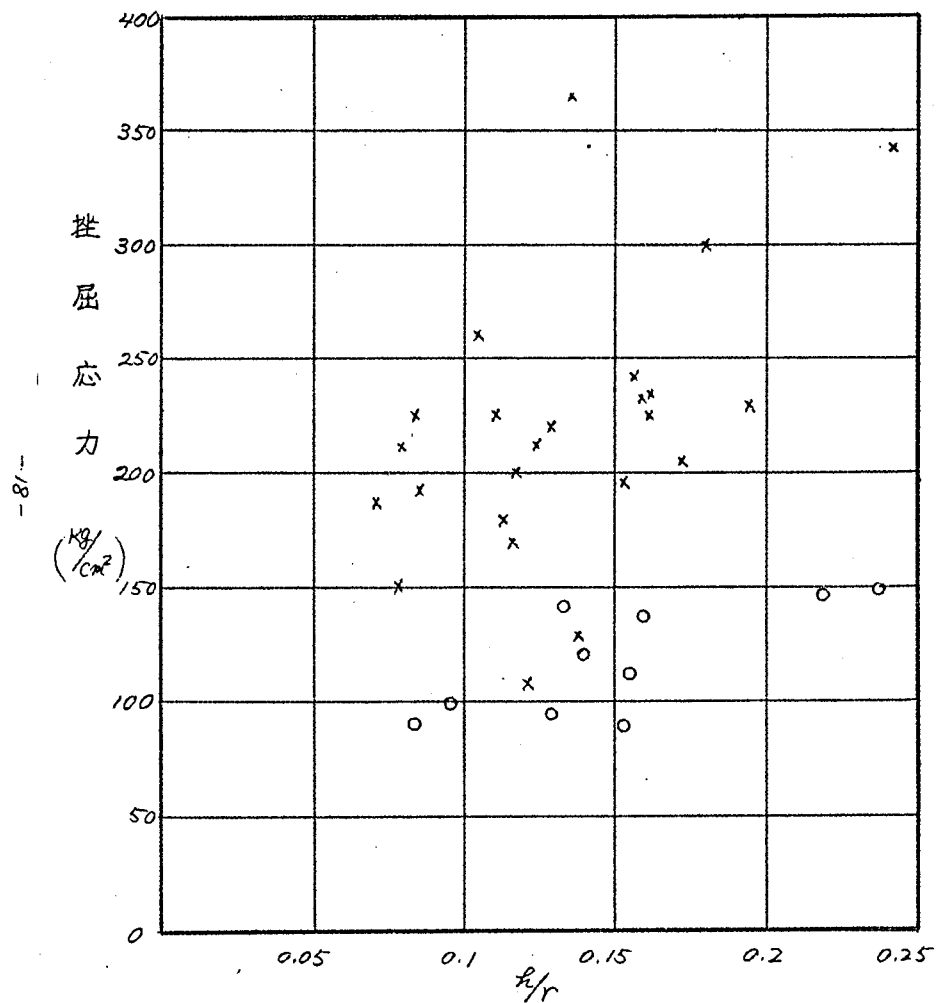
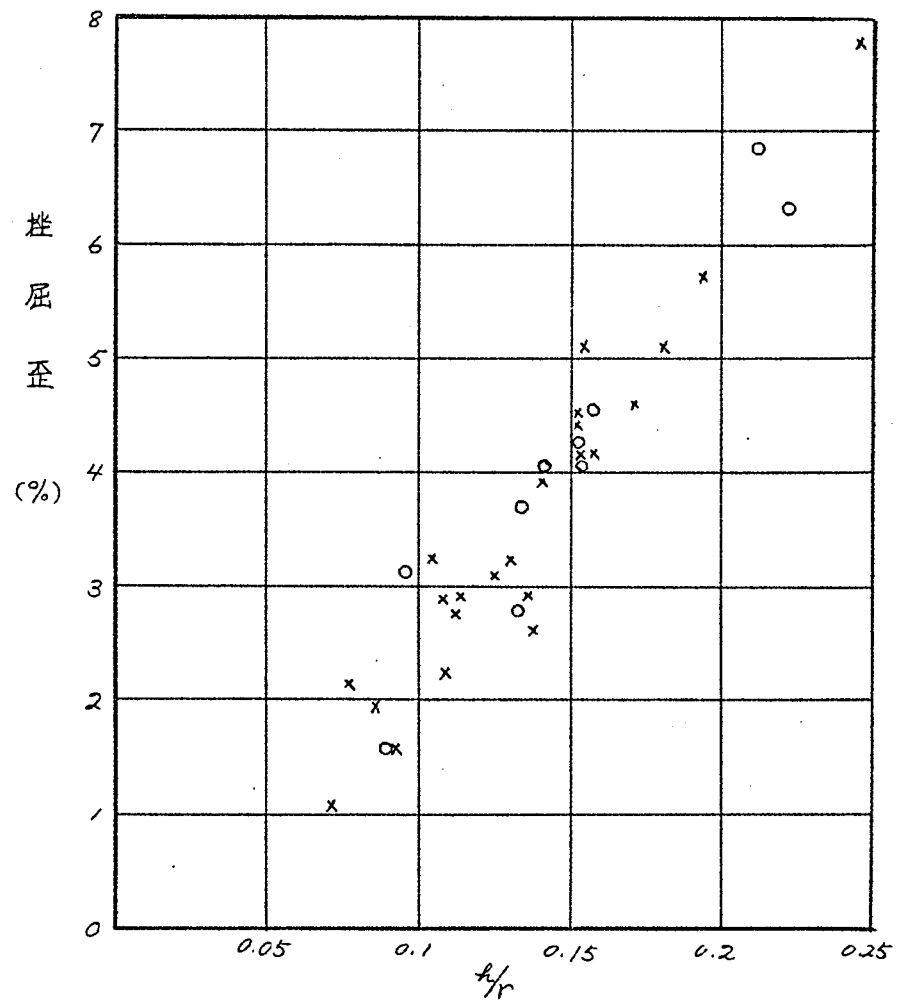
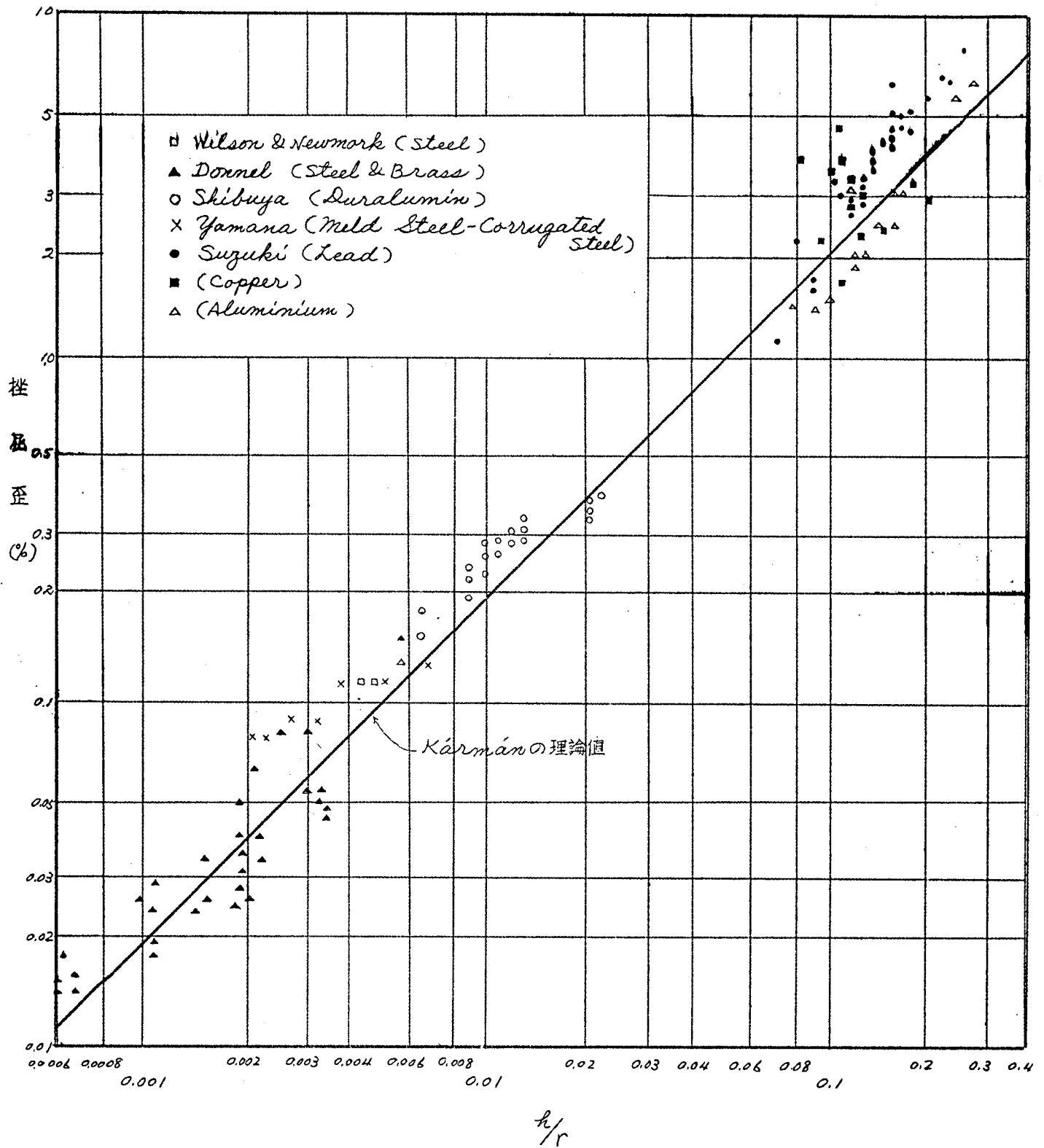


图10 屈服歪 -  $k/r$  特性

(○ 純鉛  
× 更合金鉛)



才11図 捩屈歪 -  $\frac{h}{r}$  特性



れており前記 Geckeler 氏の式によれば  $\sqrt{\frac{K}{E}}$  に比例して減少する。また、弾性域挫屈では今迄発表された式は、何れも挫屈歪は  $\frac{h}{r}$  に比例し、材料によらない一般関係を示す。

筆者はこれらに着目して、従来多くの人により実験されて来た真鍮、デユラルミン、鋼および前記鉛の軸方向圧縮実験<sup>(8)(9)</sup>を挫屈歪により整理し、さらに、これにアルミニウム、銅の実験を追加し、 $\frac{h}{r}$  - 挫屈歪図を作成した。これをオ 11 図に示す。

ケーブルは長尺物であるため、その取扱いにおいては受ける応力を知ることとは難しいが、歪を知ることが容易であるので、歪による整理はその点でも好都合である。また、内外構造物の挫屈限界を比較するためにも挫屈歪で整理することが望ましい。

オ 11 図に見る如く挫屈歪は  $\frac{h}{r}$  が 0.0006 から約 500 倍の 0.3 に至る広範囲において、しかもこれらは各材料の性質が著しく異なり、かつ弾性域、塑性域の両者を含むにもかゝわらず、 $\frac{h}{r}$  に対して極めて有意な相関をもつことは誠に興味深い。

オ 10 図において鉛管の合金成分に無関係な結果が得られたことにつき、従来の説では  $\frac{\text{応力}}{\text{臨界点応力}}$  - 歪特性がほとんど等しいためであると説明して来たが、<sup>(3)</sup>オ 11 図の如くこの特性のはなはだしく異なる金属も含めて有意な相関をもつことは、この説によつては説明しきれないことを示している。

また、これらはいずれも Kármán-Tsien 氏 (1938) の有限変形理論による解析からの下方応力<sup>(9)</sup>

$$\sigma_w = 0.194 E \frac{h}{r} \doteq 0.2 E \frac{h}{r}$$

を歪に変えた

$$\varepsilon_w = 0.2 \frac{h}{r}$$

こゝに  $\varepsilon_w$  は挫屈歪

なる直線の如くに分布した。

Kármán-Tsien 氏の上式は弾性域挫屈に対して有限変形理論の立場から導かれたものであり、従来の古典的理論値

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{h}{r} \doteq 0.6 E \frac{h}{r}$$

よりも合理的とされ、実験にも合うと云われている。<sup>(2)</sup>

オノ図において  $\frac{h}{r}$  の大きい右端の一群(鉛、アルミ、銅)はいずれも塑性域対称挫屈であり、また、実験値に相当なバラッキがあるが、このような実験が中々困難なことを考え合すれば、これら材料の塑性域の場合も

$$\varepsilon_{cr} = 0.2 \frac{h}{r}$$

として考察をすゝめて良い と考える。また、金属円筒で電力ケーブル構成に使用されうるものは現在のところ、上記鉛、アルミ、銅以外にはない。

等方性円筒におけるこの関係は次節の積層円筒の基礎となるもので(積層条件を極限迄向上せしめたものにあたる)その点でも重要である。また、

この関係は電力紙ケーブル以外で、弾性域挫屈を起すような若い金属帯円筒を有するケーブルの捲取ドラム至決定等に利用され得る。

このような軸方向圧縮実験は円筒の真円度、上下の端末処理、材料の均質の程度等バラッキとなる要因が多く、前記実験値だけから各材質円筒に有意差ありとすることは困難であると思う。

後章に示す如く挟り挫屈においても、上記  $\varepsilon_{cr}$ ,  $\frac{h}{r}$  の関係の如く各種材質円筒での実験が材料によらない一般的関係で表わされている。

なお、上記実験は *Demison universal testing machine* および *Olson universal testing machine* により、サンプル長は  $6r$  としたものである。

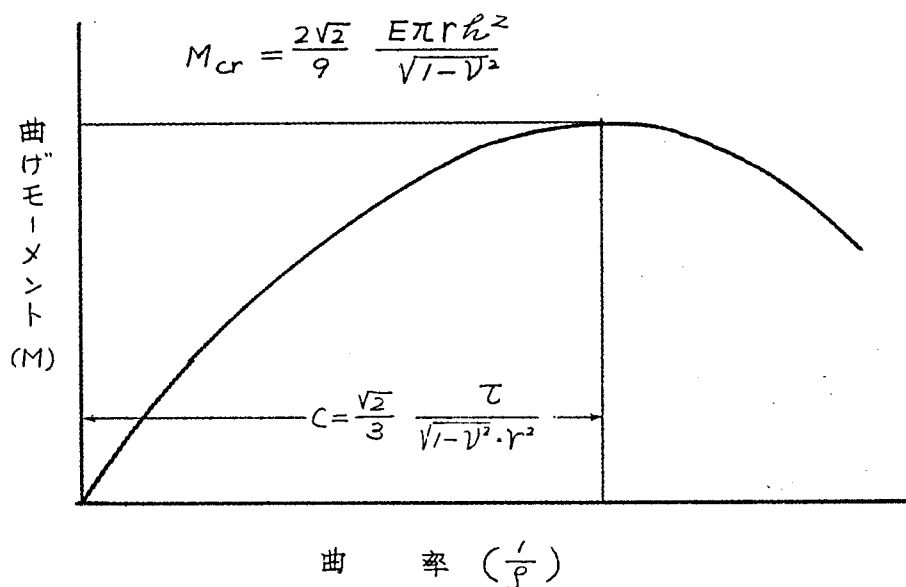
### 2.1.3. ケーブル被覆円筒の曲げ<sup>(3)(10)</sup>

ケーブル被覆は鉛または、アルミ円筒からなり、当然パイプとしての性質を表すので、一般の金属円筒の曲げと同様その曲げ挫屈特性は軸方向圧縮挫屈と密接な<sup>連</sup>関係をもつことが考えられる。一般の金属円筒でこの関係が研究されたのは薄肉円筒の弾性域挫屈のみであるが、理解を助ける意味で略述すればつぎの通りである。

薄肉円筒が曲げを受けた場合は断面の扁平化による屈服または局部挫屈により破損する。L. G. Brazier 氏 (1927) は薄肉円筒が曲げられる時楕円形に扁平化し、ついに曲げ抵抗が減じて破損に至ることを理論的に見出した。<sup>(10)</sup>

#### オ 12 図

円筒の曲げにおける曲げモーメント  
と曲率の関係



この屈服時のモーメントは

$$M_{cr} = \frac{2\sqrt{2}}{9} \times \frac{E\pi r h^2}{\sqrt{1-\nu^2}}$$

従つて

$$\varepsilon_{cr} = \frac{2\sqrt{2}}{9} \times \frac{1}{\sqrt{1-\nu^2}} \times \frac{h}{r} \doteq 0.314 \frac{h}{r}$$

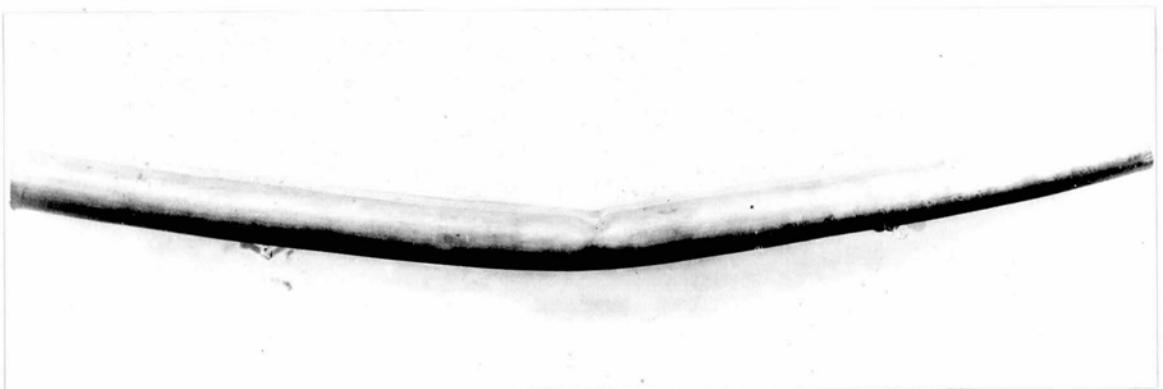
(断面係数  $Z \doteq \pi r^2 h$ )

しかし、実験によれば、一般に破損部はむしろ局部的に多皺形で、扁平化の直前に瞬間的に局部挫屈変形をする。そしてこの局部挫屈は扁平化屈服と無関係ではなく、扁平化の途中において円筒の圧縮側に生じ、その変形様式は軸方向圧縮の弾性域挫屈変形様式と同じである。この曲げに依る局部挫屈応力は純粋圧縮時の挫屈応力より大きく、安全側に出るといわれており、Donnel 氏の実験の場合も約 1.4 倍を示した。<sup>(9)</sup>

従つて、曲げ挫屈において軸方向圧縮による弾性域挫屈と同様の変形を示すものは後章の生鉄円筒の如く直接曲げ挫屈と関連して扱つてよいであらう。

なお、これらはもちろん一回の曲げおよび一回の圧縮による変形について取扱つたものである。ところでケーブル被覆<sup>材</sup>の場合は厚肉であり、曲げによりゴム管に見られるように扁平化をなし、塑性域においてある荷重で屈服する。鉛管の場合の屈服状態をオ 13 図に示す。

オ 13 図 空鉛管の屈服状況



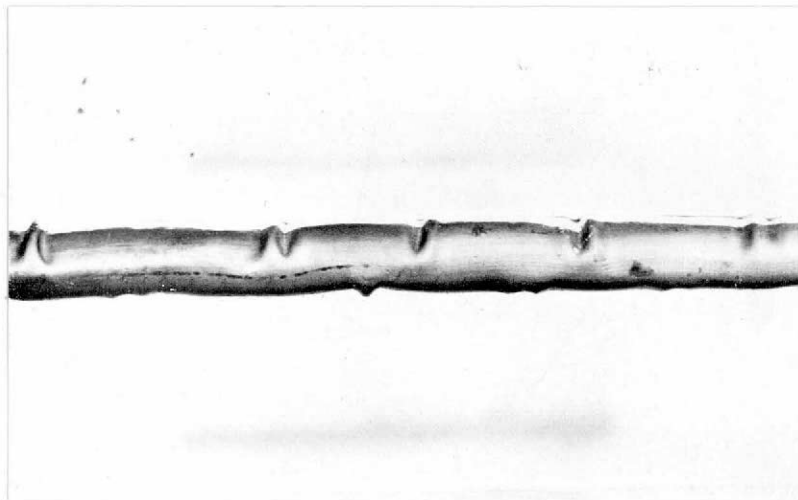


すなわち、ケーブル被覆材である鉛管、アルミ管の場合は前記弾性域における軸方向圧縮挫屈と曲げによる局部挫屈との関係の如く、両者の挫屈が同一の変形様式を示さず、軸方向圧縮の場合には塑性域対称挫屈を、曲げの場合は屈服を示すので、これらの空円管の場合は直接両者を結びつけて考えることは困難である。

ケーブル被覆の場合は当然内部コアの上に被覆され、被覆の曲げ剛さと内部コアの硬さに関連し変形様式が異なる。市内電話ケーブルの如き多少変形しうるコアを用いた場合では、空管の屈服に近い状態を示し、繰返し曲げることにより内部にも折込む皺を生ずる（※14図）。

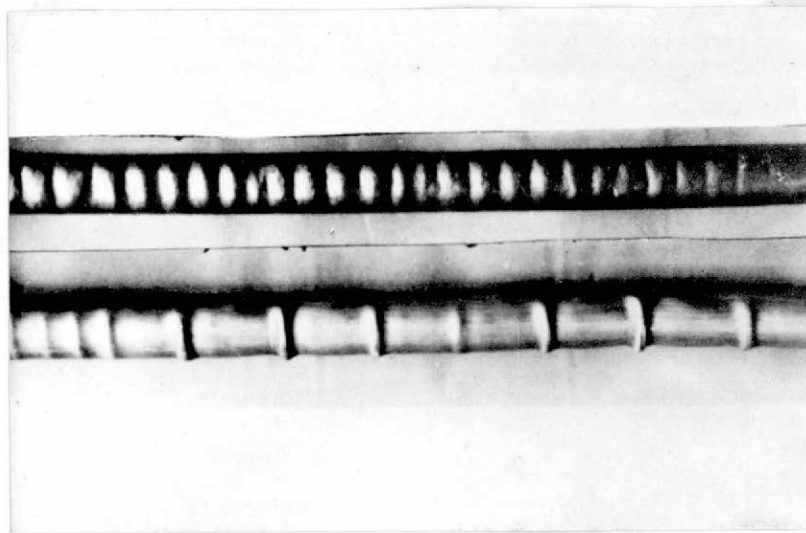
また、硬いコアを有する電力紙ケーブルの場合は鉛被、アルミ被とも外部に出る皺となつて表われる（※15図）

電話  
※14図 市内紙ケーブルの曲げによる皺  
鉛 被



オノ5図 電力紙ケーブルの曲げによる皺

上、鉛被 下、アルミ被



すなわち、電力紙ケーブル鉛被の如く内部に硬いコアを有する被覆では、鉛管の楕円化を防ぎ、屈服は起さないで、軸方向圧縮による対称挫屈に近い形で圧縮側の余分の長さがはじき出され、曲げの繰返しにより皺となつて発達する。従つて例えば中空鉛管では挫屈皺の如きは発生しないで屈服する。

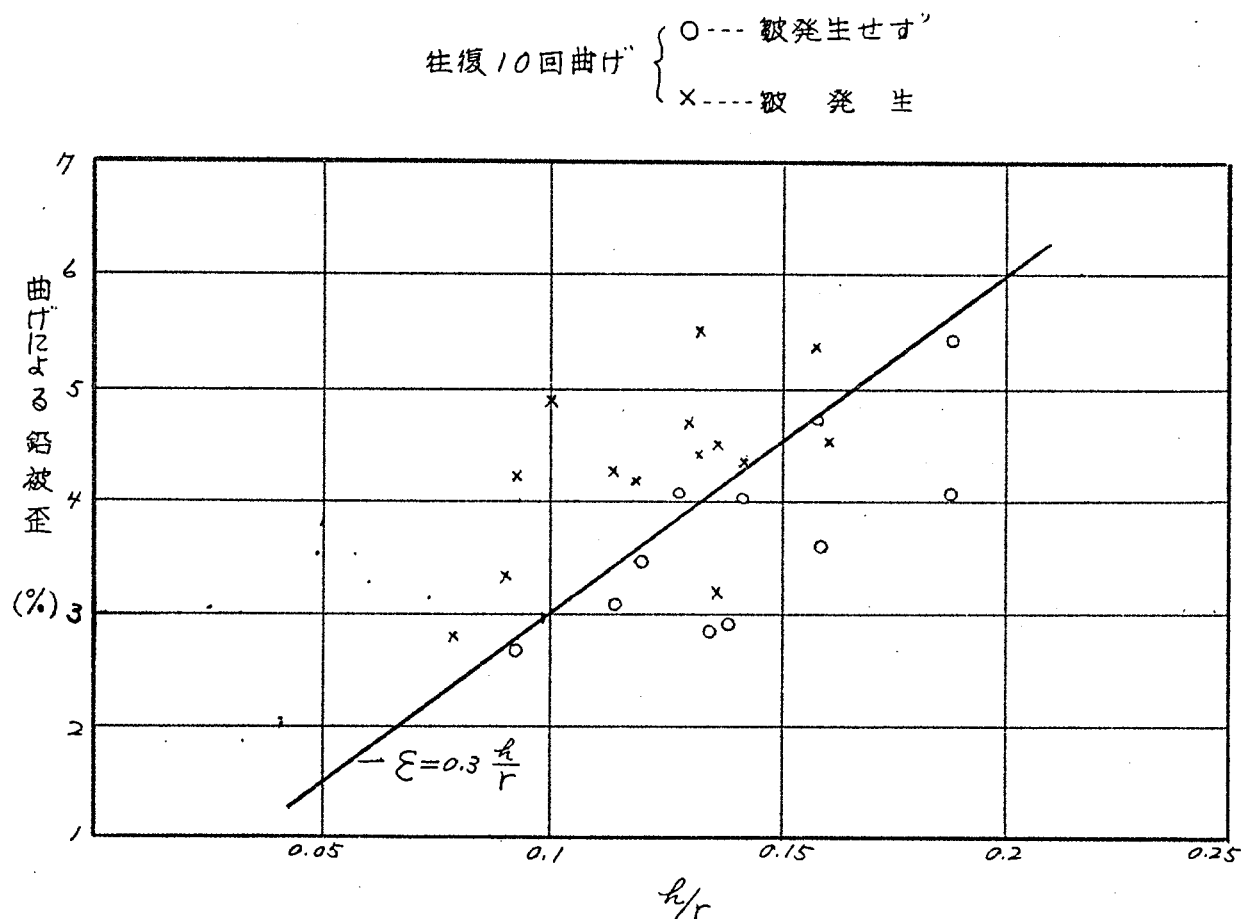
電力紙ケーブルでは、曲げによる挫屈時の鉛被歪は前節の軸方向圧縮による挫屈歪より遙かに高く、筆者の実験では通常の電力ケーブル鉛被に1回の片側曲げをあたえる場合、前記軸方向圧縮挫屈歪の2倍程度の歪を与えても挫屈発生は認められなかった。

しかしながら、われわれのケーブル取扱いは、何回か繰返しドラムに捲取るので1回の曲げによる挫屈限界よりも繰返し曲げによる変形が問題となる。鉛の如く弾性限の低い軟かい金属では変形が顕著でなく、また、反対方向に曲げた場合張力を受けて多少変形が元に戻る傾向がある。また、鉛被の締め、内部コアの状況および曲げ方によりバラッキを生じやすいが、電力ケーブル鉛被での往復10回の曲げ実験において

明らかなる挫屈皺を発生する限界は ㉞/6 図の如くであつた。図において曲げによる鉛被歪  $\varepsilon$  は  $\varepsilon = 0.3 \frac{h}{r}$  に近い値を示した。

この如く  $\frac{h}{r}$  に比例した値が得られたこと、および上述の如く挫屈皺が対称挫屈に近い形ではじき出されることより、曲げによる皺発生は軸方向圧縮挫屈によりその傾向は求められるであらうが、このような繰返し曲げの皺発生限界値と従来の説の如く、直ちに空鉛管の圧縮挫屈歪の値と関連させることには無理があると思う。

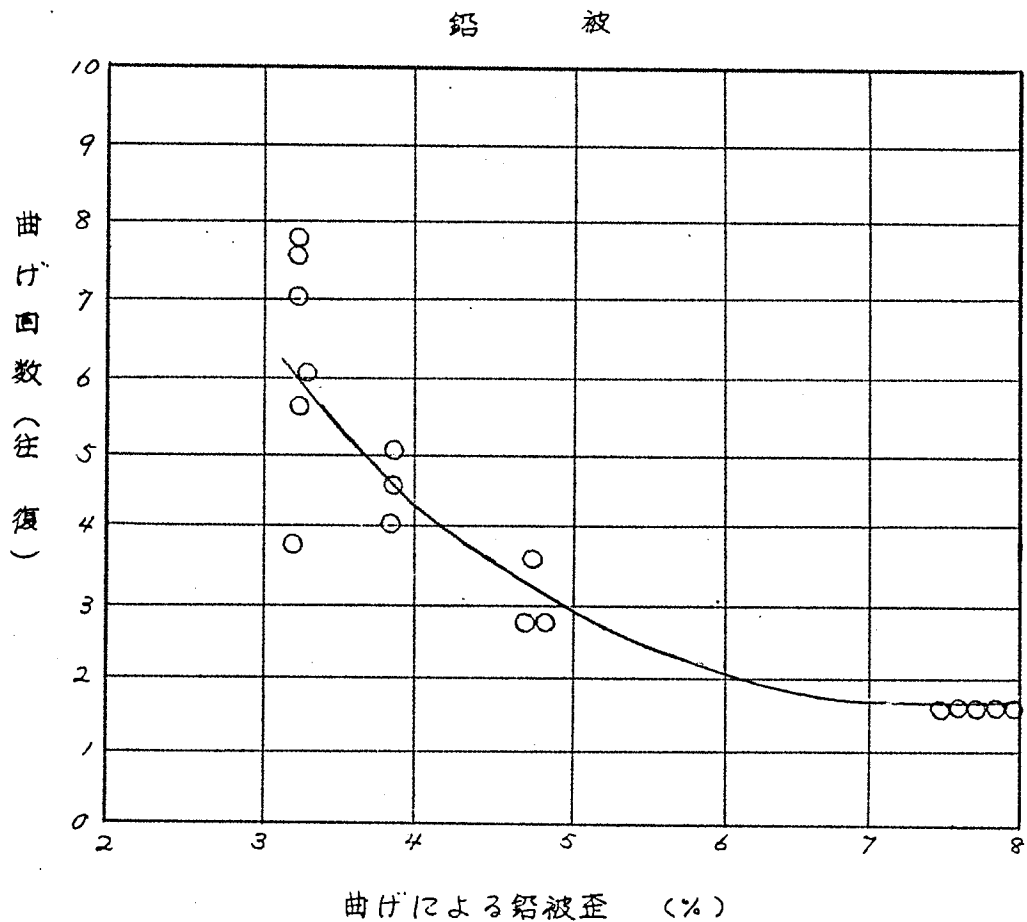
㉞/6 図 電力ケーブル鉛被の皺発生限界



立つて起っているからである。

なお、 $\phi 17$  図は  $3.3 \text{ KV } 3 \times 22 \text{ mm}^2$  ベルトケーブルの例であり、外  
 径  $22 \text{ mm}$ 、肉厚  $1.3 \text{ mm}$  の鉛被をもつものである。試料長は  $1 \text{ m}$ 、  
 往復に要する時間は  $40 \sim 60$  秒である。上述によりケーブル被覆の実  
 用上の皺発生限界はほぼ明らかであり、被覆厚決定の一つの基準にはな  
 るが、実際問題として被覆厚みを定める決め手にはなりえない。

$\phi 17$  図 挫屈皺発生迄の曲げ回数



たとえば、前記 10 回往復時の値  $\varepsilon_{cr} = 0.3 \frac{h}{r}$  (今定数表されたもの  
 もこれに近い) を使用しても、鉛被外径の 20 倍の曲げ (ケーブル巻送  
 ドラムは大体この基準である) で挫屈皺を発生しないためには、 $h = \frac{2}{12.6}$   
 の厚みが必要であり、現行の動力ケーブル鉛被厚はほぼこの  $\frac{1}{2}$  である。

これは実用上、経済上の制約に基づくもので被の目立たぬ範囲で、また、振動、伸縮、膨張、亀裂をある程度防ぎうる範囲の肉厚で使用されており、理論的な鉛被厚を採用せしめることは実際には難しい。

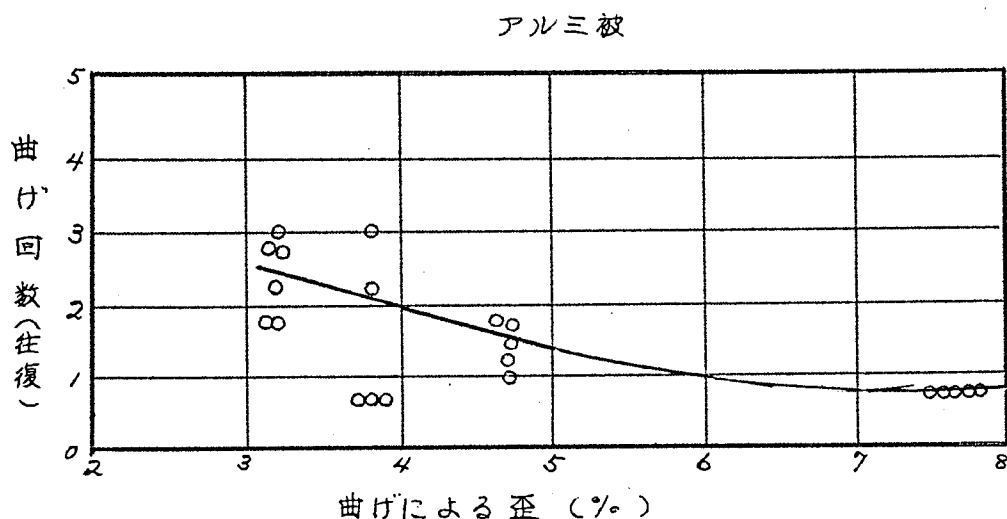
以上述べて来たところにより、従来の説明では空管正縮挫屈歪とケーブル鉛被曲げ挫屈歪を直接関連ありとした為、コアの存在及曲げ回数との関係を説明するのに無理がある事を述べ、これに関する検討線と説明した、

つぎにアルミ被では挫屈歪を生じやすく、電力ケーブルの場合も鉛被と同一歪に巻いて取扱うことには無理があるが、外国文献には時々鉛被と被発生条件が変らぬことが発表せられている。

このことは前節の軸方向圧縮挫屈歪が鉛被、アルミ被ともほぼ等しいことおよび実験によればアルミ管の楕円変形量が鉛管と変わらないこと<sup>(1)</sup>からも推断される筈である。

しかし、われわれの実験ではアルミ被の場合は曲げ剛さが大であり、均一歪に曲げにくいので、曲げ方法により大きく異なり、細物で屈曲部近傍を押すようにして部分的に極端な曲げを与えぬよう注意して曲げた場合は鉛被に近い特性を示すが、このような事は実際的な取扱いに当っては望めぬことである。

※ 18 図 挫屈被発生迄の曲げ回数

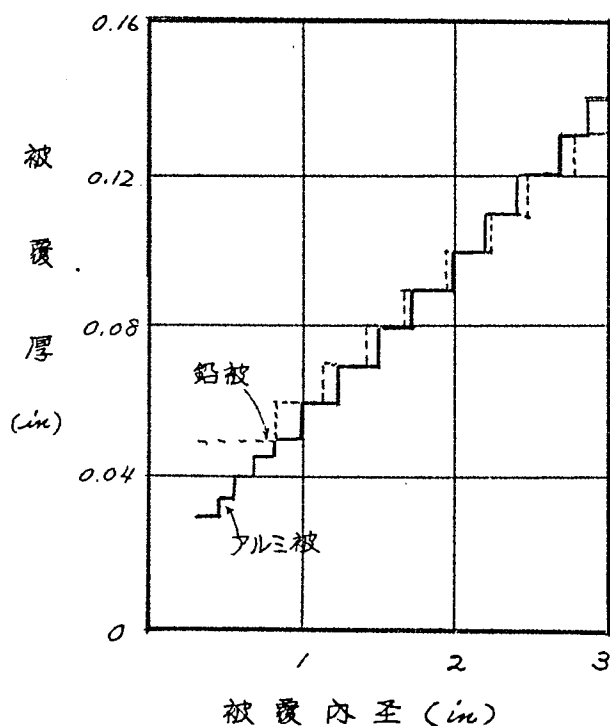


上記の如き注意を払わず、鉛被の場合と同様な曲げ試験を行つた結果を、オ/8図に示す。

試料は オ/7図の鉛被ケーブルと、内部コア、被覆内厚、試験条件を等しくしたものであるが、鉛被の場合に比し同一曲げ歪における挫屈迄の曲げ回数は約  $\frac{1}{2}$  の値を示し、同一曲げ回数で皺を発生する曲げ歪の値は約  $\frac{1}{1.5}$  であつた。従つてアルミ被ケーブルは鉛被ケーブルの場合に比して大きな曲げ歪をとるべきであり、ケーブルドラム巻には、許容曲げ半径を  $1.5$  倍以上にする必要がある。また、布設時のくせ取りにはくせ取り器の使用等部分的に極端な曲げを避けるよう努めることが必要である。

ちなみに、アルミ被電力ケーブルは振動伸縮膨脹、亀裂に対し鉛被より格段に強く肉厚を薄くしうるはずであるが、皺の発生を減らす意味でオ/19図（英国標準規格）の例の如く鉛被と同一の厚みが採用されている。<sup>(12)</sup>

オ/19図 英国標準規格被覆厚



#### 2.1.4 ケーブル被覆円筒の曲げによる変形条件の向上について<sup>(14)</sup>

円筒の曲げによる変形条件を向上するものとしては古くから色々の工夫がなされている。

此等は大別すれば

1. 内圧を加えるもの。
2. 異方性円筒とするもの
3. 円筒の内側または外側に他の物質を附与して変形を押えるものの。

の三つになる。

Flügge 氏の研究によれば薄肉円筒の圧縮の際の挫屈応力は内圧によりほとんど高められていない結果が出ている。<sup>(13)</sup> また池田健氏はセルロイド管の実験において内圧の存在により曲げ強度の増加は期待できないことを明らかにした。<sup>(14)</sup> すなわち、内圧は単に断面の扁平化を防ぐ効果をもつのみで挫屈応力そのものに直接には関係がない。

われわれの扱うケーブル被覆材料では、空管の場合は扁平化により破損する厚肉パイプであるので、内圧が直接的に変形条件の向上に役立つ。

この場合の変形量と内圧および曲げの曲率との関係は池田氏によればつぎの如くである。<sup>(14)</sup>

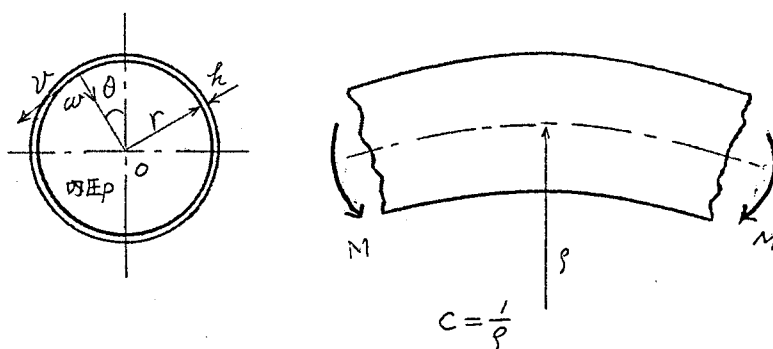
周方向の変位  $v$  および半径方向の変形  $w$  は

$$v = A \sin 2\theta, \quad w = 2A \cos 2\theta$$

$$\text{こゝに } A = \frac{(1-\nu^2)C^2 r^5}{2h^2} \bigg/ 1 + \frac{4(1-\nu^2)r^3}{h^3} \cdot \frac{P}{E}$$

こゝで  $P=0$  なる場合は Brazier 氏の内圧のない場合の楕円変形量の式に相当する。(オ 20 図参照)

図20 円筒の内圧および曲げをうける円筒



従つて内厚半半径比の小なるもの程、また、材質<sup>の</sup>ヤング率の小なるもの程内圧により扁平化は減少することになる。電力ケーブルでは内に固いゴアをもつてはいるが、特殊なケーブルでは内圧により変形条件を向上させる。

つぎに異方性円筒では、ケーブル被覆は外半径を制限されるので一部の肉厚を増して補強円筒とすることは意味がない。しかし異方性円筒の一つである波付円筒とすることはアルミ被の場合には有効である。これについては次節に述べる。

また、円筒の内および外に他の物質を附加して変形を押えることは挫屈による皺の発生を押える意味においては大いに有用である。

たとえば、電力ケーブルの場合、外側には鋼帯、補強帯または、防蝕層を有することが多いが、完成時の20倍2往復曲げ試験において裸鉛被のまゝのものは殆んど小さな皺を発生するのに対し、(前章で述べた如く現行の被覆厚は挫屈皺を完全に防ぐには足りない)装錠、防蝕層を有するものは皺の発生は有意に少い。

この内外の物質による影響は後節に述べる積層円筒および円筒の内外構造物との組合せにおける問題と関連するので、これを参照することに



よりその影響は一層明らかになると考える。

以上曲げによる挫屈変形条件向上につき簡単にのべたが、等方質のま  
ゝで挫屈を防ぐには円筒のディメンション（ $r$  または  $t$ ）を変えるか、  
曲げ半径を大きくするか、または、内外から変形発達を押える以外にはな  
い。

### 2.1.5 結 言

本節においては、電力紙ケーブルに見られる等方性円筒たるケーブル被  
覆が曲げを受けた場合の現象につき、軸方向圧縮挫屈と曲げによる挫屈皺  
との関連を主体に記述した。

軸方向圧縮では弾性域、塑性域を含め歪による整理により広い範囲に  
わたり実験的相関が得られた。この関係は電力紙ケーブル以外で、弾性域  
挫屈を起すようなうすい金属帯円筒を有するケーブルの巻取ドラム歪決定  
等に応用され得る、また、後述の積層円筒の特性を知る上での標準とし  
ても重要である。

被覆の軸方向圧縮挫屈と曲げの挫屈皺との関係は主として通信ケーブル  
について研究されて来たが、従来のものは、<sup>著</sup>圧縮挫屈歪と曲げ挫屈歪を直  
接関連ありとした為、コアの存在及曲げ回数との関係を説明するのに無理があった  
ので、これについて検討した。また、アルミ被は鉛被より挫屈しやすいが、これ  
は主として曲げ方法にもとづくことを述べ、この間の事情を明らかにし  
アルミ被挫屈防止に対する一指針を与えた。また簡単な実験による比較  
ではアルミ被の許容曲げ半径は鉛被の約1.5倍を示した。

## 2.2. 異方性円筒の曲げ

### 2.2.1. 緒 言

電力ケーブル構成材における異方性円筒としては、

1. 材質自体が異方性であるものとして絶縁層円筒があり
2. 補強円筒に類似な構造をもつものとして溝付鉛被があり
3. 波板円筒として波付アルミ被がある。いずれも前節同振曲げによる  
挫屈皺の発生が問題となり、これにより取扱いが制限される。

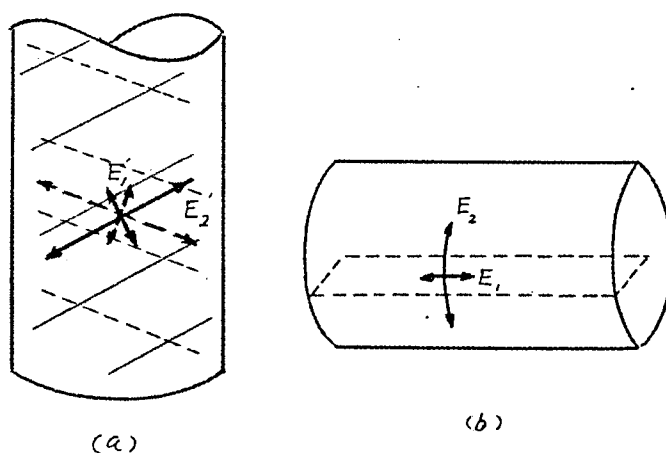
本節ではこれらにつき簡単に記述する。

### 2.2.2 絶縁層円筒<sup>(15)(16)(17)</sup>

ケーブル絶縁層は螺旋形に纏捲せる紙テープの集合からなる。従つて各紙層は曲げその他の外力をうけてスパイラルとしての動作もするが、紙の弾性率が非常に低いのに対し、紙厚が小さく紙間の接触がよいので円筒として考察すべきである。この紙テープは縦方向ヤング率が横方向ヤング率の2〜3倍であつて、これが何枚かづつ交互方向に纏捲される。

従つて絶縁層紙円筒は周方向ヤング率が軸方向ヤング率より大きい斜方晶系直交異方性円筒である。

オ2/ 図 絶縁層のつくる直交異方性円筒



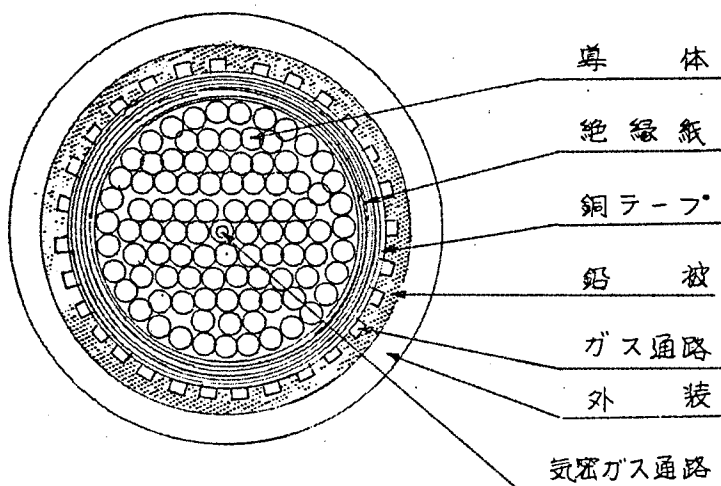
しかし、この絶縁層のつくる円筒は筆者の研究の結果では、直交異方性の厚肉円筒と云うよりは、積層円筒として別に分類する方が良いと考えるので、その項において取扱うこととする。

### 2.2.3. 溝付鉛被<sup>(18)</sup>

ケーブル鉛被では自蔽型圧力ケーブル（OFケーブルおよび低ガス圧ケーブル）の場合、圧力媒体たる油もしくはガスの通路として、また、OFケーブルの場合は被鉛後の乾燥を容易ならしめるために溝付鉛被を使用することがある。

その構造は例えば図22図に示す通りである。

図 22 溝付鉛被を有する単心低ガス圧ケーブル



溝付鉛被の如く周方向凸出部のある場合の円筒の軸方向圧縮弾性域坐屈は、Dji - Djian Deshou 氏 (1935) が計算している。<sup>(18)</sup>

この場合周方向の有効厚  $h_y$  は

$$h_y = h + \frac{A_g}{d_g}$$

ここに  $h$  : 厚み

$A_g$  : 凸出部面積

$d_g$  : 凸出部間隔

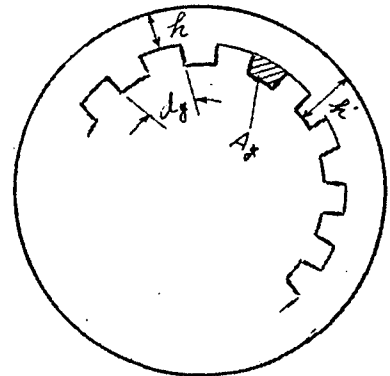
この時挫屈応力  $\sigma_{cro}$  は

※23図 溝付鉛被

$$\sigma_{cro} = \sigma_{crI} \times \sqrt{\frac{h_g}{h}}$$

こゝに  $\sigma_{crI}$  ……肉厚  $h$  なる等方  
性円筒の挫屈応力

すなわち、 $h$  なる厚みの円筒に対し  $\sqrt{\frac{h_g}{h}}$   
だけ向上することとなる。



ケーブル鉛円筒の如き塑性域の場合もこ  
れに比例すると見てよいが、鉛被の場合はむしろ肉厚  $h'$  (突起をふく  
めた厚み) の円筒が溝の分だけ挫屈応力を低下したというべきである。  
上式は等方性円筒の場合と同様直接的に曲げ限界に利用することは難し  
いが比較の意味で鉛厚、溝深さを決定する際の一基準になりうる。

#### 2.2.4. 波付アルミ被ケーブル

紙ケーブルシース材料としては鉛が主として用いられて来たが、最近  
これに代るものとしてアルミが伸びて来ている。アルミ被の扱いやすさ  
を改良したものに波付アルミシースが考察されているが国内では未だ実  
用に供されていない。

これはベローズの如く軸方向に螺旋型に波付し、ベローズ同様許容曲  
げ歪の増加を計つたもので、その点確かに有効であり、このような波板  
円筒構造は今後もケーブル構造に取り入れられて行くものと考えられる。

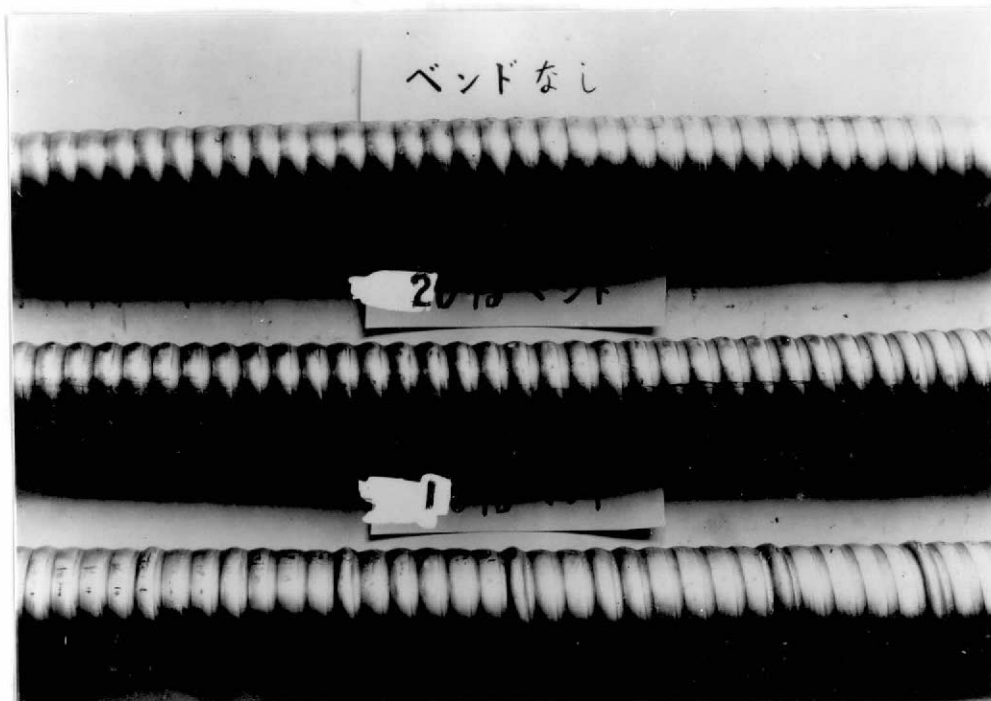
波付形状には *Balgenmantel* 型と *Wellmantel* 型の二種類がある。

当社における試作ケーブルは後者であったが、筆者等の軸方向圧縮実  
験によつてはモーメント最大部たる凸起部に歪が集中して部分的に屈服  
し、筒としての挫屈は生じなかつた。

曲げテストによる変形も、図 24 の如くで軸方向圧縮テストと同様な変形を示した。<sup>(9)</sup> 従って外国文献に発表している如く波付形状の理論的設計も可能であると考ええる。

曲げ特性以外にも多くの長所をもち、アルミ押出機の設置に伴って相当な普及を見るものと思う。

図 24 波付アルミ被の曲げ試験結果



### 2.2.5 結 言

電力紙ケーブルに見られる異方性円筒の曲げにつき説明した。絶縁層は便宜上次節に積層円筒として別に取扱う。

溝付鉛被および波付アルミ被は現状では稀な場合であるが、分類上の意味を含め簡単に述べた。溝付鉛被では曲げ歪屈に関連する圧縮歪屈の式を掲げて鉛被厚決定の一基準を示し、波付アルミ被は今後取り入れられて行く構造の一つとして簡単な実験とともに紹介した。

## 2.3 積層円筒の曲げ<sup>(15)(16)(17)</sup>

### 2.3.1 緒 言

電力紙ケーブルに見られる積層円筒としては、前節にも述べた絶縁紙層が主たるものであろう。海底線および O.F ケーブルの場合に二重鉛被が用いられることもあるが、二重鉛被の場合は積層というより組合せ円筒と云うべきで、材質に比して内外両鉛被間の接着度が低く、積層条件により内外の鉛被の挫屈条件が向上することは少い。(二重鉛被の場合、層間にアスファルト等のコンパウンドが入る。)

絶縁紙層は製造工程により

生紙円筒 —— 抄紙された紙をそのまま、または、調湿して纏  
捲したもの(水分約 3~10%)

乾燥紙円筒 —— 約 115°C、100~200 時間乾燥したもの(水分約 0.1%)。

油浸紙円筒 —— 上記に絶縁油を含浸せるもの(含油率は体積で約 55%)

の三つに分けうる。

このような絶縁層が曲げにより問題を起すのは主として皺の発生および紙テープの破断である。本節では前者につき研究を行い、後者は後章において触れる。

絶縁層の皺発生問題はベルトケーブルの曲げおよび扇形ケーブルの撓合せで古くより注目され、その対策がとられて来たが、皺の発生機構についてはあまり検討されていない。

重者は絶縁層が積層条件のよい紙テープの集合からなるので、パイプとしての性質をもつべきであると考え、これにより基礎的研究を行った結

果、絶縁層の皺もケーブル鉛絞と同じく挫屈に基づくものであることを発

見出し、単心ケーブルでもケーブル電圧の高圧化および導体サイズ  
の大型化に伴い、この問題が表面化することを発表して来  
たが、<sup>(15)(27)</sup> 昨今ケーブルの超高圧化とともに急にクローズアップされ  
て来た観がある。

なお、この絶縁層はケーブルの電気特性を左右するもので、電気的な面では  
国内および国外で多くの研究があるが、機械特性については  
と見るべきもの少く、主に絶縁紙テープとしての物理的特性が研究され  
ていたにすぎない。また、ケーブル以外で積層円筒としてベニヤ板等が  
あるが、これは接着剤を用いるので、積層円筒としての性質を示さず、  
直交異方性円筒として研究されている。

ケーブル絶縁層は珍しい積層円筒であり、かつ、均質である点面白い  
研究対象である。

絶縁紙円筒の曲げ試験による詳細な実験には困難な面があり、軸方向  
圧縮テストから研究をすすめた。これにおいては始めに各円筒自身のパイ  
プとしての性質を調べ、つぎに内部心および外部被覆との組合せの場合  
につき研究を行った。

### 2.3.2 生紙円筒の軸方向圧縮試験<sup>(28)</sup>

ケーブル絶縁層は厚さ  $0.025 \sim 0.15 \text{ mm}$ 、巾  $10 \sim 20 \text{ mm}$  の紙テ  
ープが数枚～数百枚（400枚にも達するものもある）何枚かづつ、  
交互方向にスパイラル状に纏巻られて形成され、直交異方性の積層円筒  
をつくる。

纏巻されるクラフト紙テープのヤング率は振動試験において実測せる

共振周波数から算出したところによれば、電力ケーブルに使用される程度の叩解度のものでは、

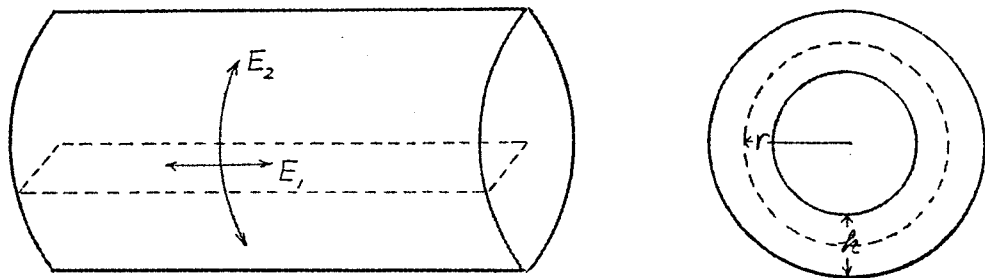
$$\text{縦方向} \quad 4 \sim 8 \times 10^4 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$\text{横方向} \quad 1.5 \sim 3.5 \times 10^4 \quad \text{kg/cm}^2$$

で縦方向ヤング率が横方向のヤング率の2~3倍である。

纏巻紙テープは5~20°の小さなピッチ、アングルで密巻されるので、各紙テープ円筒の主方向ヤング率は縦方向ヤング率が横方向ヤング率の $\frac{2}{3} \sim \frac{3}{2}$ となる。

ヤ25図 絶縁紙のつくる直交異方性円筒



いま、積層円筒の圧縮試験を述べる前に、その基となる直交異方性外板をもつ円筒の軸方向圧縮について今迄の研究を調べて見る。

この安定問題については、その弾性主方向が筒軸と周方向に平行な場合について山名氏、Dachow氏、Neck氏、林氏の研究があり、外板の持つ独立な直交異方性弾性を軸圧縮挫屈荷重の一般式は林氏によって求められている。<sup>(20)</sup> これは Donnell 氏の微少変位理論を更に拡張したものである。(微少変位理論については相当議論があるようであるが。)

同一材質、一樣なる板厚の外板をもつ円筒の挫屈応力  $\sigma_{cr}$  は、

軸対称変形挫屈では

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\frac{E_1 E_2}{3(1-\nu_1 \nu_2)}} \cdot \frac{h}{r}$$



こゝに  $h$  : 板 厚

$r$  : 中心半径

$E_1, E_2$  : 弾性率 (オ 2 / 図参照)

$G$  : 剪断弾性率

$\nu_1, \nu_2$  : 平面内に対するポアソン比

非対称変形挫屈では、

$$\sigma_{cr} = C \times \sqrt{\frac{E_1 E_2}{3(1-\nu_1 \nu_2)}} \cdot \frac{h}{r}$$

$$\text{こゝに } C = \sqrt{\frac{\sqrt{E_1 E_2 + 2G(1-\nu_1 \nu_2)} + E_1 \nu_2}{\sqrt{E_1 E_2 + (E_1 E_2 / 2G)} - E_1 \nu_2}}$$

いずれも与えられた弾性に対しては、 $E_1$  と  $E_2$  の方向 (主方向) を取替えても挫屈応力は変らない。

また、非対称の場合は長さ方向と周方向の挫屈半波長比  $K = 4\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$  となり、主方向を替えることにより挫屈半波長比は  $4\sqrt{\frac{E_1}{E_2}}$  から  $4\sqrt{\frac{E_2}{E_1}}$  に変化する。

絶縁紙円筒の場合はこれ等異方性円筒の積層体であり  $E_1, E_2$  の測定も難しく、また数学的解析も困難であるが、上述の結果より考えて  $\frac{E_1}{E_2}$  で整理することとした。

、 先ず、生紙円筒の軸方向の圧縮による挫屈限界を求めるためにオ一表に示すサイズの紙円筒により実験を行った。

実験に用いた紙円筒は O. F. ケーブルの如く導体中央にスパイラルを入れ、スパイラルから抜いて行くことにより作成した。試料の上下面は平行になるように細目ヤスリで充分仕上げた。(グラインダーで仕上げた場合は端末で非常に低い歪で挫屈する) 圧縮に用いた試験機は *Devison*

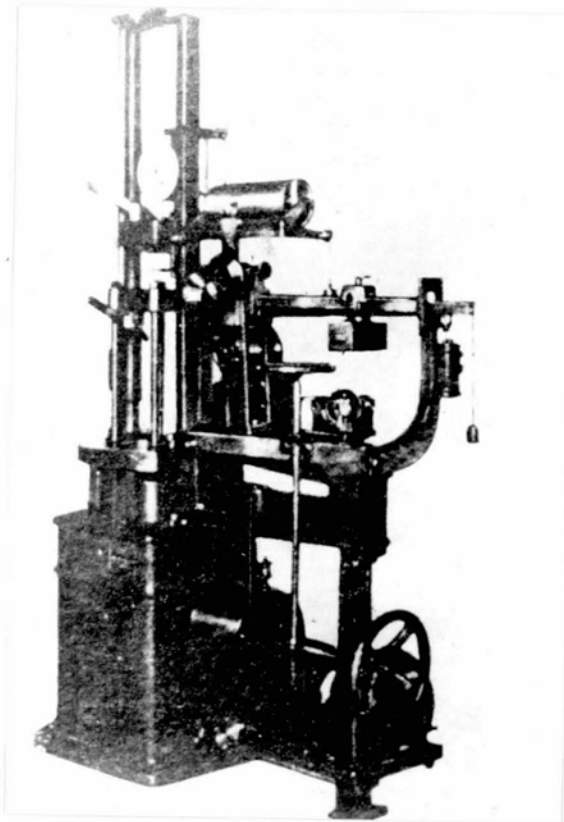
*universal testing machine* および *Olsen universal testing machine* (オ26図)である。

実験は上記の試験機の圧縮面に試料およびダイヤルゲージを入れ、徐々に圧縮し、視察により円筒の壁面が挫屈しかかつたと同時に圧縮を止め、この時の圧縮量を記録したが、挫屈の発見は容易であつた。

実験結果によれば生紙円筒は内方変位の優勢な非対称変形挫屈を示し、*Robertson* 氏、*Lundquist* 氏が金属で観察した弾性域挫屈と同じ現象を呈した。

後出のオ38図の紙筒の *stress-strain curve* を見れば、挫屈発生は筒としては弾性域の現象とは考えられないが、円筒が紙テープの集合からなり、圧縮時の紙テープの移動により紙自身の受ける歪は弾性域内であるためこのような現象を示すものと考えられる。(オ27図参照)

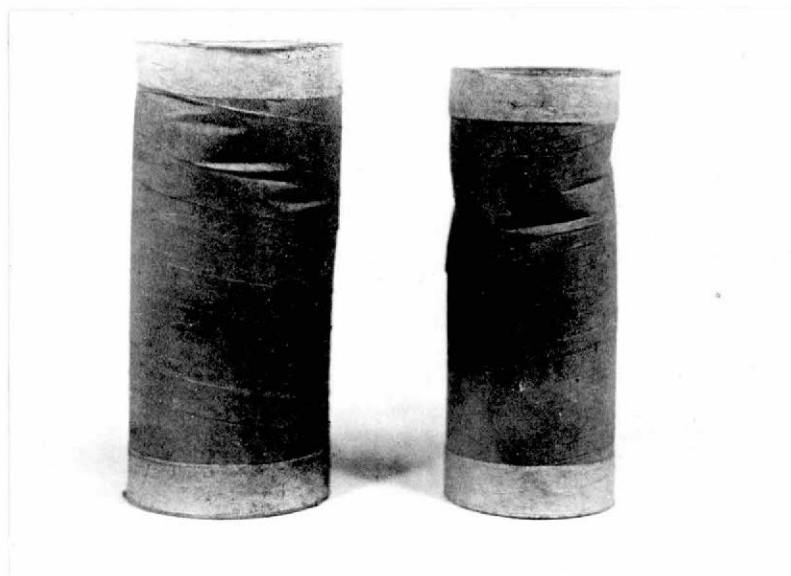
オ26図 圧縮試験機



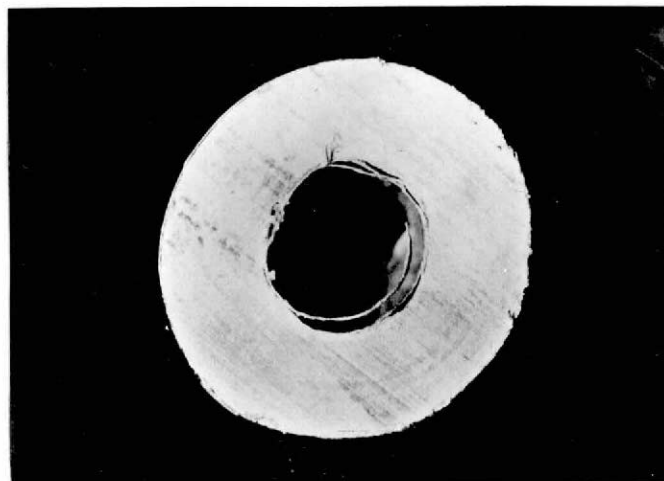
この場合、長さ方向の挫屈半波長 $\ell$ は周方向半波長 $\ell_1$ よりも小さくなる。  
これはオ25図において $E_1 < E_2$ であるから、

$K = \frac{\ell}{\ell_1} = \sqrt[4]{\frac{E_1}{E_2}} < 1$  となることから考えうるところである。

オ27図 軸方向圧縮による生紙円筒の挫屈



オ28図 挫屈した生紙円筒の断面



オ27図は挫屈後更に圧縮したもので、挫屈箇所は円周に亘って約10ヶ所へ状に発生している。オ28図はこの挫屈箇所の断面を示すが、挫屈による変形は円筒内部の方が大きく、内面では紙帯境界線に沿って螺旋形に発生する。

積層円筒の場合の軸方向圧縮による挫屈歪は、勿論積層条件により異なる。実験に用いたものは、紙厚  $0.125\text{ mm}$ 、密度  $0.89 \sim 0.9$ 、紙の含湿度約  $4\%$ 、纏巻張力  $4 \sim 5\text{ kg}$ 、紙巾  $19\text{ mm}$ 、ピッチ  $19.7\text{ mm}$  のものである。

オ29、30図およびオ1～3表に圧縮挫屈歪 —  $\frac{t}{r}$  特性を示す。積層円筒ではあるが、積層でないものと比較しやすいように  $\frac{t}{r}$  をとり、またケーブル取扱いでは応力による整理は困難であるので歪によることとした

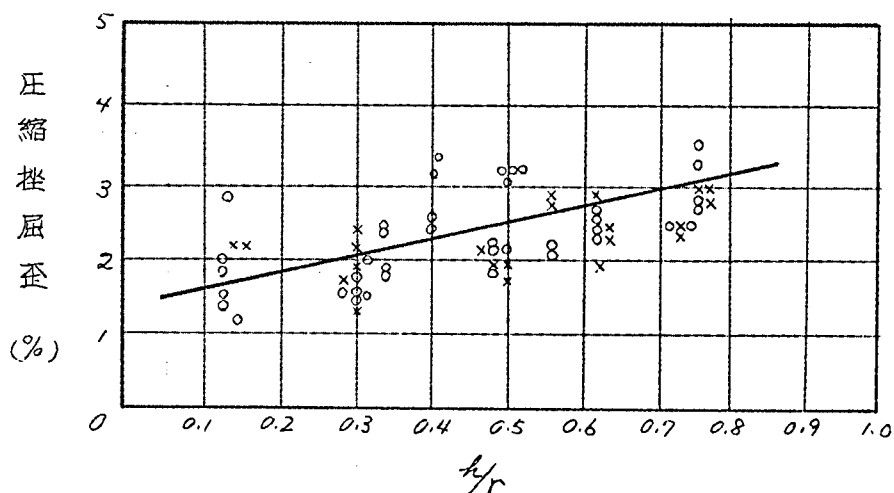
図に示す如く、挫屈歪は  $\frac{t}{r}$  に比例して漸増し、実験範囲内では、 $1 \sim 4\%$  であり、等方性円筒に比して  $\frac{t}{r}$  の割には相当小さい値を示した。

オ29図 圧縮挫屈歪 —  $\frac{t}{r}$  特性 (生紙圧縮速度  $6\text{ mm/min}$ )

捲方向による比較

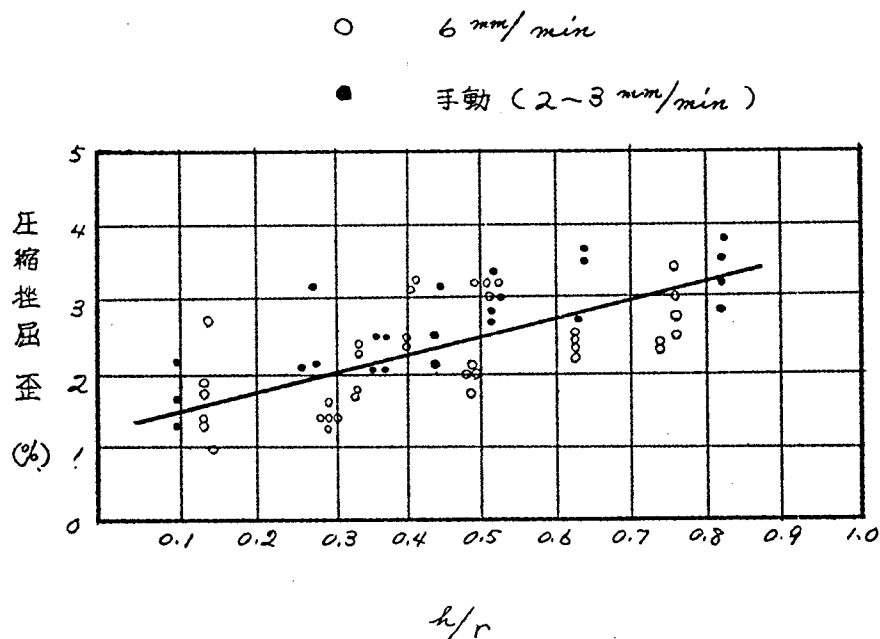
○ ---- 交互方向捲

× ----- 同方向捲



※30図 圧縮挫屈歪 -  $h/r$  特性 (生紙交互捲)

圧縮速度による比較



上記実験範囲の  $h/r$  は 200 K $\nabla$  以上の超高压ケーブルを除きほとんどのケーブルが包含されるが、この特性曲線の傾斜および  $h/r$  で整理可能な範囲は紙捲張力の大小等により当然変るものである。

また、※29図の如く交互方向捲 (一般に各国とも採用す) と同方向捲との間には有意差は認められなかつた。従つて、挫屈に關してだけからは同方向捲によりその特性を向上することはできない。

また、※30図に示す如く 6 mm/min の圧縮速度と手廻しによる約 2~3 mm/min の圧縮速度との間にも有意差はない。なお、※1表 (交互 6 mm/min) 試料番号 25~28 に相当する円筒を毎分 1, 6, 10, 20 mm の圧縮スピードで試験した時の挫屈歪を※31図に示すが、やはり圧縮速度による差は認められなかつた。従つてわれわれがケーブルを取扱う程度の曲げ速さにより差の生ずることはないと考えられる。

オ / 表 生紙円筒の圧縮試験 (その1)

交互方向巻、圧縮速度  $6\text{mm}/\text{min}$

試料番号	外 径 (mm)	内 径 (mm)	紙 厚 $h$ (mm)	紙円筒 中心半径 $r$ (mm)	$\frac{h}{r}$	紙円筒 の高さ (mm)	圧縮撓屈歪 $\varepsilon$ (%)
1	38.8	22.8	8	15.4	0.509	92.5	3.24
2	38.5	"	7.8	15.2	0.506	90.0	3.33
3	"	"	"	"	"	90.5	3.32
4	"	"	"	"	"	90.3	3.1
5	34.6	"	5.9	14.3	0.412	80.0	3.38
6	34.5	"	5.85	"	0.409	78.5	3.18
7	"	"	"	"	"	79.8	2.51
8	"	"	"	"	"	80.5	2.49
9	32.2	"	4.7	13.7	0.343	84.5	2.46
10	"	"	"	"	"	85.5	1.76
11	"	"	"	"	"	84.5	2.37
12	"	"	"	"	"	84.6	1.77
13	26.3	"	1.75	12.2	0.135	74.7	1.34
14	"	"	"	"	"	74.0	1.48
15	"	"	"	"	"	72.2	1.8
16	"	"	"	"	"	71.5	1.95
17	40.0	18.0	11.0	14.5	0.759	85.5	2.8
18	"	"	"	"	"	86.5	2.6
19	"	"	"	"	"	87.5	3.2
20	"	"	"	"	"	88.0	3.5
21	34.5	"	8.25	13.1	0.63	75.0	2.5
22	35.0	"	8.5	"	0.64	76.8	2.3
23	"	"	"	"	"	77.0	2.4
24	"	"	"	"	"	76.5	2.6
25	29.5	"	5.75	11.8	0.487	68.8	1.8
26	"	"	"	"	"	"	2.1
27	"	"	"	"	"	"	2.2
28	"	"	"	"	"	69.5	2.1
29	24.5	"	3.25	10.6	0.306	62.8	1.4
30	"	"	"	"	"	61.5	1.5
31	"	"	"	"	"	"	"
32	"	"	"	"	"	60.8	1.7

(内径を変える)

33	40.0	18.5	10.7	14.6	0.733	117	2.48
34	"	"	"	"	"	116.5	2.49
35	"	22.4	8.8	15.6	0.564	110	2.09
36	"	"	"	"	"	109.5	2.19
37	"	29.5	5.25	17.37	0.304	102.5	1.95
38	"	"	"	"	"	"	1.46
39	"	34.6	2.7	18.5	0.146	94.2	1.06
40	"	"	"	"	"	92.5	2.81

表 2 生紙円筒の圧縮試験 (その 2)

同方向巻、圧縮速度  $6\text{mm}/\text{min}$

試料番号	外 径 (mm)	内 径 (mm)	紙 厚 $h$ (mm)	紙円筒 中心半径 $r$ (mm)	$\frac{h}{r}$	紙円筒 の高さ (mm)	圧縮挫屈歪 $\varepsilon$ (%)
1	40.0	18.0	11.0	14.5	0.759	87.3	2.8
2	"	"	"	"	"	87.0	3.0
3	"	"	"	"	"	86.5	3.6
4	"	"	"	"	"	87.0	2.9
5	34.5	"	8.25	13.1	0.63	86.5	2.4
6	"	"	"	"	"	76.8	2.9
7	"	"	"	"	"	76.2	1.9
8	"	"	"	"	"	76.0	2.3
9	29.5	"	5.75	11.8	0.487	68.7	1.9
10	"	"	"	"	"	69.5	"
11	"	"	"	"	"	68.7	2.0
12	"	"	"	"	"	66.1	1.8
13	24.5	"	3.25	10.6	0.306	61.5	1.7
14	"	"	"	"	"	62.0	1.3
15	"	"	"	"	"	60.5	1.8
16	"	"	"	"	"	61.5	2.0

(内径を変える)

17	40.0	18.5	10.7	14.6	0.733	117	2.47
18	"	"	"	"	"	"	2.39
19	"	22.4	8.8	15.6	0.564	109	2.84
20	"	"	"	"	"	"	2.66
21	"	29.5	5.25	17.37	0.304	102	2.06
22	"	"	"	"	"	"	2.35
23	"	34.6	2.7	18.5	0.146	93.2	2.14
24	"	"	"	"	"	92.7	2.15

表 3 生紙円筒の圧縮試験 (その3)

交互捲、圧縮速度 約  $2 \sim 3 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  (手廻し)

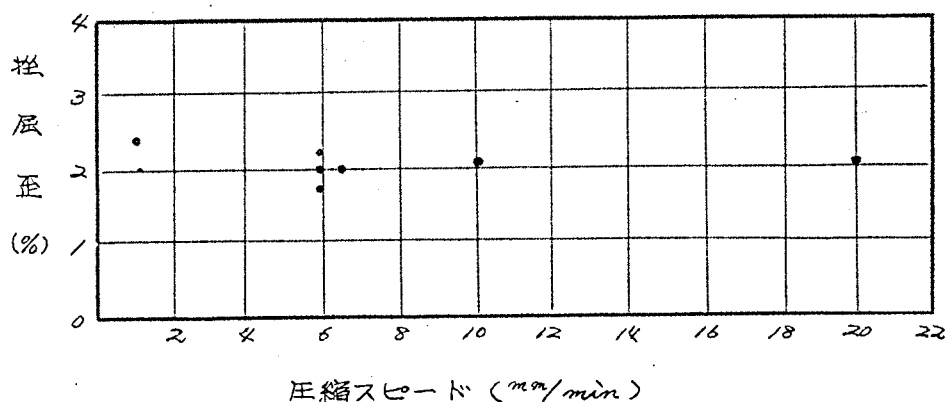
試料番号	外径 (mm)	内径 (mm)	紙厚 $h$ (mm)	紙円筒 中心半径 $r$ (mm)	$\frac{h}{r}$	紙円筒 の高さ (mm)	圧縮歪率 $\varepsilon$ (%)
1	35	18.0	8.5	13.2	0.64	78.2	3.84
2	"	"	"	"	"	77.5	3.61
3	"	"	"	"	"	"	2.84
4	30.6	"	6.3	12.1	0.52	70.7	3.39
5	"	"	"	"	"	71.8	2.92
6	"	"	"	"	"	71.6	2.79
7	"	"	"	"	"	71.2	3.09
8	26.5	"	4.2	11.1	0.378	65.5	2.13
9	26.0	"	4.0	11.0	0.364	"	"
10	26.2	"	4.1	11.05	0.372	66.2	2.57
11	"	"	"	"	"	65.8	"
12	61.0	25.5	17.7	21.6	0.82	131.0	2.9
13	"	"	"	"	"	"	3.84
14	"	"	"	"	"	"	3.69
15	"	"	"	"	"	"	3.36

(内径を変える)

16	35.1	22.3	6.4	14.3	0.447	99.0	2.12
17	"	"	"	"	"	98.0	2.55
18	"	"	"	"	"	98.1	3.26
19	36.0	27	4.5	15.7	0.286	92.3	3.27
20	36.2	"	4.6	15.8	0.29	92.0	2.17
21	35.7	27.2	4.2	15.7	0.267	"	"
22	35.0	31.5	1.75	16.6	0.105	85.4	1.52
23	"	"	"	"	"	85.0	1.76
24	"	"	2.0	16.7	"	"	2.23
25	"	"	1.75	16.6	"	"	1.41



オ3/図 圧縮スピードと挫屈歪の関係



### 2.3.3. 乾紙円筒の軸方向圧縮試験

絶縁紙円筒の乾燥後の特性を見るためオ4表のサイズの円筒を115℃ 200時間真空乾燥を行い、水分を除いた。乾燥後油浸せず曲げを受けるケースルはOFケースルだけであるので、ほぼ、これに近い乾燥条件とした訳である。この乾燥後のケースル内水分は約0.7%である。

乾燥器から取出して実験にかゝる迄の時間は出来るだけ短縮したが、ある程度の吸湿はやむをえなかった。試料作成方法は生紙同様試験直前にあらかじめ挿入したスパイラルから順次導体を除いて作成した。乾燥した試料は圧縮中にパチパチ音なする。音がすると固もなく挫屈する。挫屈の判別は生紙のそれに比して幾分困難である。この場合、生紙の挫屈変形とは少し異なり、大きくわん曲する。

そして少い変形では荷重を除けば元にもどる。また、挫屈箇所も生紙より少く円周に亘つて6~7箇所へん状に発生する。なお、オ32図は挫屈発生後、更に圧縮を続けて変形させたものである。この場合も内部の変形の方が大きく、内部紙テープ境界に沿い螺旋形に変形する。

※32図 乾紙円筒の圧縮挫屈



実験の状況からは厚肉ゴム管の圧縮に近い変形であり、曲げによる等方性円筒の屈服に似ており、生紙とは別な変形様式の現象のように考えられる。

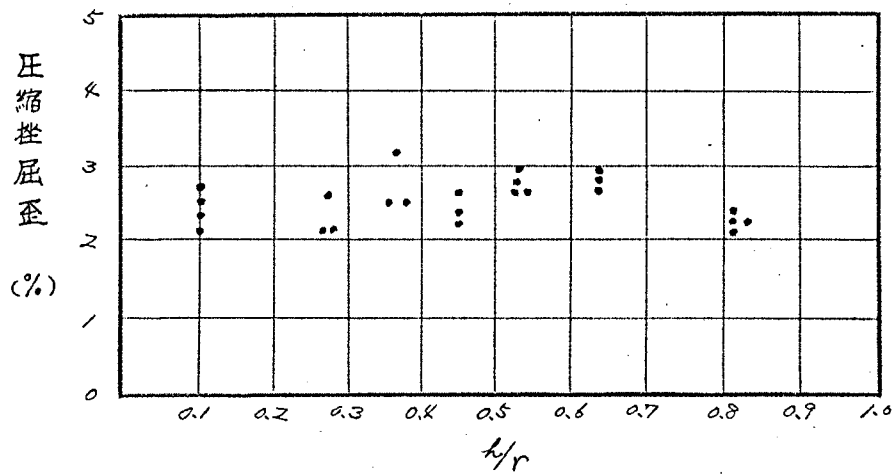
※4表および※33図に挫屈歪と  $\frac{t}{r}$  の関係を示す。これによれば、挫屈歪は  $\frac{t}{r}$  が増加しても余り変らない。

これは乾燥による紙の含有水分の減少にともない一枚一枚の紙厚が減少し(※34図参照)積層条件が悪くなつて、厚み  $t$  の効果が減少するためである。(※35図)

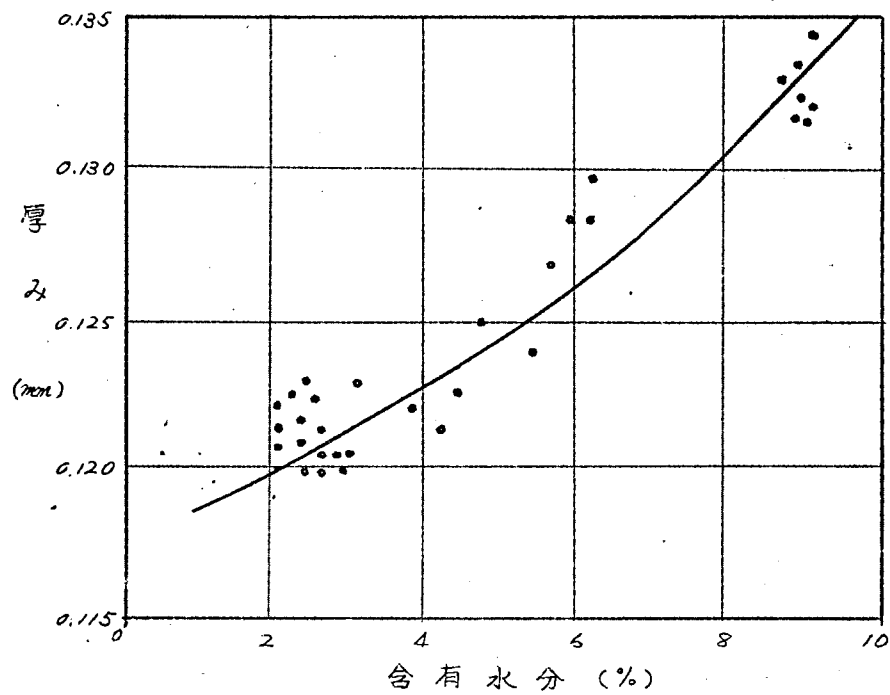
このことについては別に詳述する。

※33図 圧縮挫屈歪 ~  $t/r$  特性

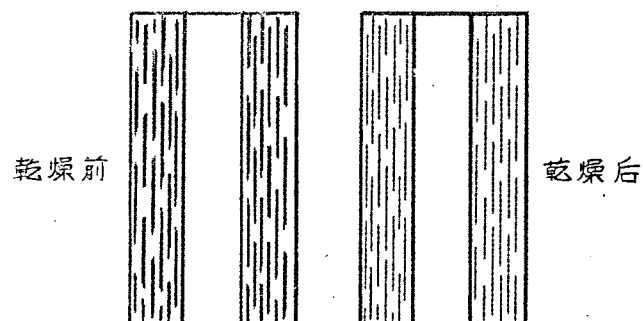
乾 紙



※34図 絶縁紙の含有水分と厚さの関係



※35図 乾燥前後の絶縁層



また  $h/r$  の小さい範囲では生紙の挫屈歪より却つて大きい値を示した。これは乾燥による水分除去のため、絶縁紙の繊維がケーフル軸方向にも収縮し、結果的に内部応力を減少させる如き効果を持つことと、紙テープがもともと *gap* をもつて纏捲されたスパイラルであるので、紙帯間々隙の増大により軸方向にさらに縮みやすくなることが原因しているものと思う。

#### 2.3.4 油浸紙円筒の軸方向圧縮試験

乾燥後の紙円筒に O.F. ケーフル用 *oil* を浸潤したものを実験に供した。試料作成方法は生紙、乾紙と同様である。サイズは表 5 に示す。表 36 図に示す如く乾燥紙と同様な挫屈歪  $\sim h/r$  特性をえた。変形様式も乾紙と同じであり、試料の一部は圧縮時パチパチ音を発した。挫屈歪  $\sim h/r$  特性が上向に走らないことは乾燥紙の場合と同一の理由によると考える。この場合、油中の紙筒と油浸後空中にさらした紙筒とは幾分異なる性質を持つと思われるが、実験の都合上油中では行えなかった。

表 36 図 圧縮挫屈歪  $\sim h/r$  特性

油 浸 紙

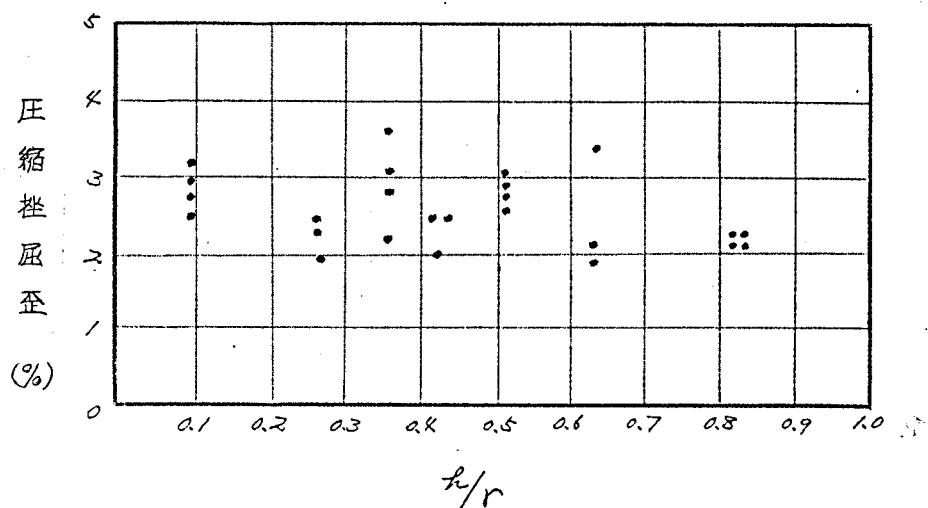


表 4 乾紙円筒の圧縮試験

交 互 捲

試料番号	外 径 (mm)	内 径 (mm)	紙 厚 $h$ (mm)	紙円筒 中心半径 $r$ (mm)	$\frac{h}{r}$	紙円筒 の高さ (mm)	圧縮挫屈歪 $\epsilon$ (%)
1	35	18	8.5	13.2	0.645	77.2	2.72
2	"	"	"	"	"	77.9	2.56
3	"	"	"	"	"	77.0	2.73
4	31	"	6.5	12.2	0.533	70.0	2.57
5	"	"	"	"	"	71.0	2.68
6	30.8	"	"	"	"	72.0	2.5
7	"	"	"	"	"	71.2	2.82
8	26.0	"	4.0	11.0	0.364	66	3.03
9	"	"	"	"	"	"	2.43
10	"	"	"	"	"	64.9	2.46
11	60.5	25.5	17.5	21.5	0.815	131.0	2.14
12	"	"	"	"	"	130.5	2.0
13	"	"	"	"	"	"	2.3
14	"	"	"	"	"	130.2	2.15

(内径を変える)

15	35.3	22.2	6.6	14.4	0.458	97.0	2.16
16	35.0	"	6.4	14.3	0.447	98.1	2.22
17	"	"	"	"	"	98.2	2.57
18	35.2	27	4.25	15.6	0.274	91.3	2.52
19	"	"	"	"	"	93.0	2.02
20	"	"	"	"	"	92.5	2.06
21	35.1	31.5	1.80	16.6	0.108	85.8	2.33
22	35.0	"	1.75	"	0.105	84.1	2.62
23	"	"	"	"	"	85.5	2.11
24	"	"	"	"	"	84.8	2.48

表 5 油浸紙円筒の圧縮試験

交互捲

試料番号	外 径 (mm)	内 径 (mm)	紙 厚 $t$ (mm)	紙円筒 中心半径 $r$ (mm)	$\frac{t}{r}$	紙円筒 の高さ (mm)	圧縮挫屈歪 $\epsilon$ (%)
1	35.0	18	8.5	13.2	0.645	77.0	2.01
2	34.9	"	8.4	"	"	79	1.84
3	35.0	"	8.5	"	"	76.9	3.39
4	31.0	"	6.4	12.2	0.525	72.0	2.92
5	"	"	"	"	"	70.2	3.0
6	30.9	"	"	"	"	70.7	2.55
7	"	"	"	"	"	71.7	2.77
8	26.0	"	4	11.0	0.364	64.5	3.57
9	"	"	"	"	"	65.5	2.14
10	"	"	"	"	"	66.0	3.03
11	"	"	"	"	"	64.5	2.79
12	61.0	25.5	17.7	21.6	0.82	135.0	2.07
13	60.5	"	17.5	21.5	"	130.0	2.23
14	61.0	"	17.7	21.6	"	"	"
15	60.8	"	17.6	20.6	"	128.0	2.03
(内径を変える)							
16	35.1	22.2	6.4	14.3	0.435	99.4	2.42
17	35.2	"	6.5	"	"	98.9	1.99
18	35.1	"	6.4	"	"	98.1	2.45
19	35.9	27	4.4	15.7	0.286	92.3	1.84
20	35.8	"	"	"	"	92.8	2.48
21	36.0	"	4.5	"	"	91.8	2.39
22	35	31.5	1.75	16.6	0.105	84.1	3.2
23	35.2	"	1.80	"	0.108	85.0	2.46
24	"	"	"	"	"	84.0	2.74
25	35.0	"	1.75	"	0.105	84.1	2.85

なお、一旦乾燥により収縮した紙は、われわれの使用するOH基の少ない絶縁油では膨潤しないので、厚みの変化はない。また紙間の摩擦係数も次に述べる如く乾紙、油浸紙の差は少いので、両円筒の積層条件は変わらず同じ特性を示したものと、考える。

紙間の摩擦係数測定例をオ6表、オ7表に掲げる。予想に反して油浸紙の方が乾紙より大きい結果を示したので、別の実験ではさらに油中でも測定を行つたが、やはり僅かながら大きい結果を示した。(オ37図)

しかし、乾紙の場合は硬さが大であり、また、歪を受けた場合の残留応力の違いにより見掛け上の摩擦係数は大きく、これは特にケーブルの曲げ戻しを行う時の紙の滑りに影響する。(後出)

オ38図に絶縁紙円筒軸方向圧縮試験における荷重—歪曲線の一例を示す。図で左側は生紙、右側は油浸紙であり、それぞれ特徴ある曲線を描く。乾燥紙の場合も油浸紙の時とほとんど同じ傾向の曲線を描く。

この荷重—歪曲線で歪が0.5%迄のほい直線状となす範囲から計算した相当圧縮ヤング率は、

生紙円筒の場合  $8,000 \sim 12,000 \text{ kg/cm}^2$

油浸紙円筒の場合  $2,000 \sim 3,000 \text{ kg/cm}^2$

でケーブルの他の部分に比して非常に小さい値であつた。

なお、絶縁紙のヤング率は既述の如くである。

横方向  $1.5 \sim 3.5 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

縦方向  $4 \sim 8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

生紙、乾紙、油浸紙いずれもサンプル長は平均半径 $r$ の6倍の長さをとつた。これは前節の鉛管サンプルに合せたものであるが、絶縁紙積層円筒の場合、軸方向挫屈波間隔もせまくサンプル長はほとんど影響しない。

表 6 静 止 摩 擦 係 数

方 向	紙 厚 条件 (mm)	0.125	0.07	0.025
	生 紙 乾 燥 紙 油 浸 紙	0.38 0.28 0.29	0.28 0.22 0.36	0.28 0.20 0.36
横 方 向	生 紙	0.48	0.33	0.45
	乾 燥 紙	0.28	0.23	0.21
	油 浸 紙	0.31	0.30	0.36

- (註) 1. W.E型により測定す。  
 2. 生紙は65%RH 28~32℃ 5日間調湿す。  
 3. 油浸紙はOF油を用い、含油率15~25% (完全含浸時は約55%である。)  
 4. 測定値のバラッキは±0.05であつた。  
 5. 静止摩擦係数は台を軽くたたくため、実際よりも小さく出たと考えられる。

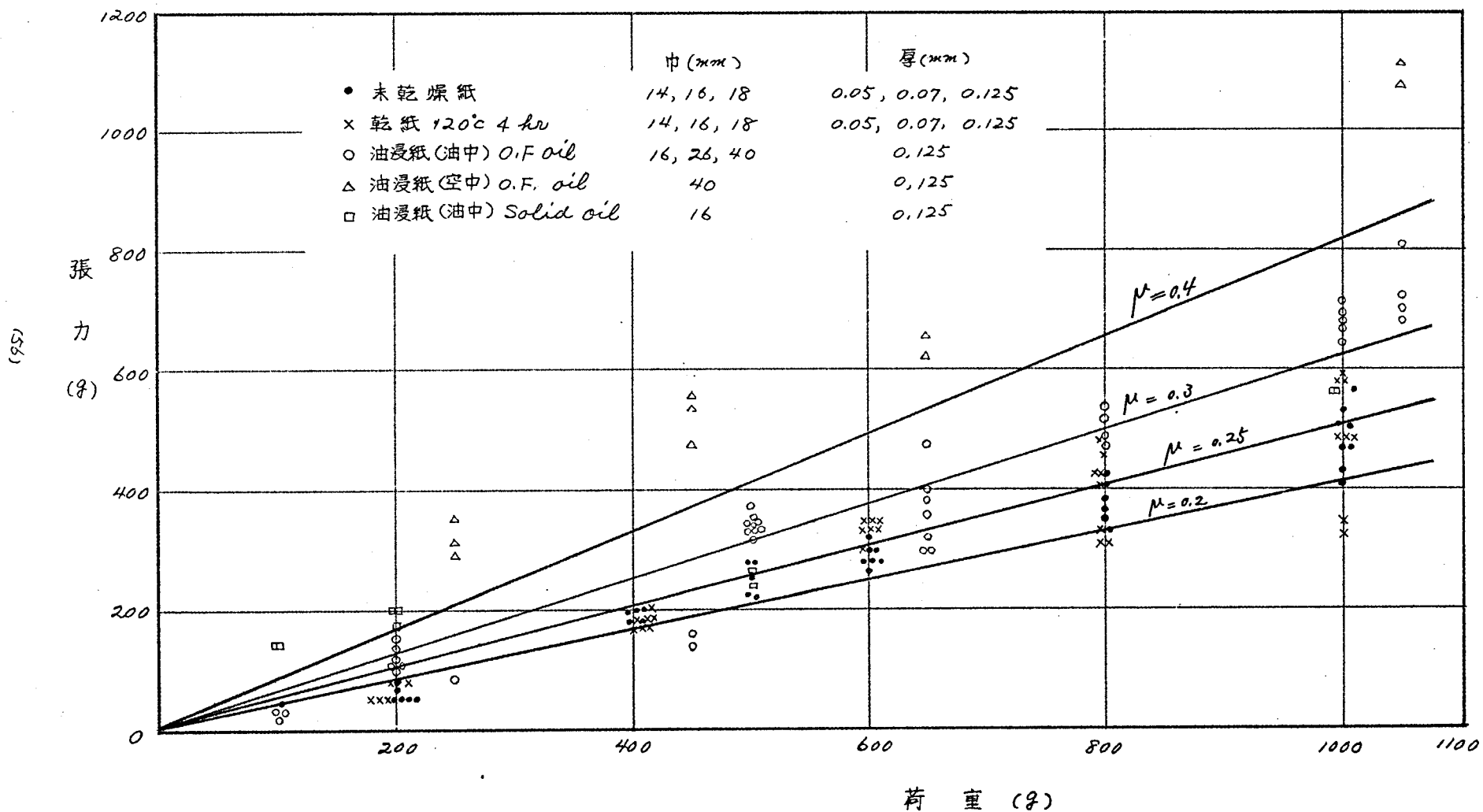
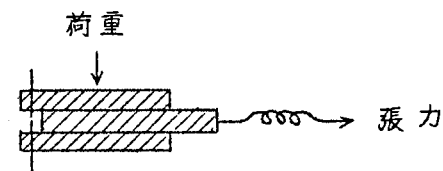
表 7 運 動 摩 擦 係 数

方 向	紙 厚 条件 (mm)	0.125	0.07	0.025
	生 紙 乾 燥 紙 油 浸 紙	0.43 0.44 0.50	0.38 0.38 0.46	0.33 0.34 0.52
横 方 向	生 紙	0.45	0.35	0.39
	乾 燥 紙	0.41	.	0.34
	油 浸 紙	0.50	0.53	0.53

- (註) 1. スプリングバランスにより測定し、荷重は735grであつた。  
 2. その他表6表に同じ。

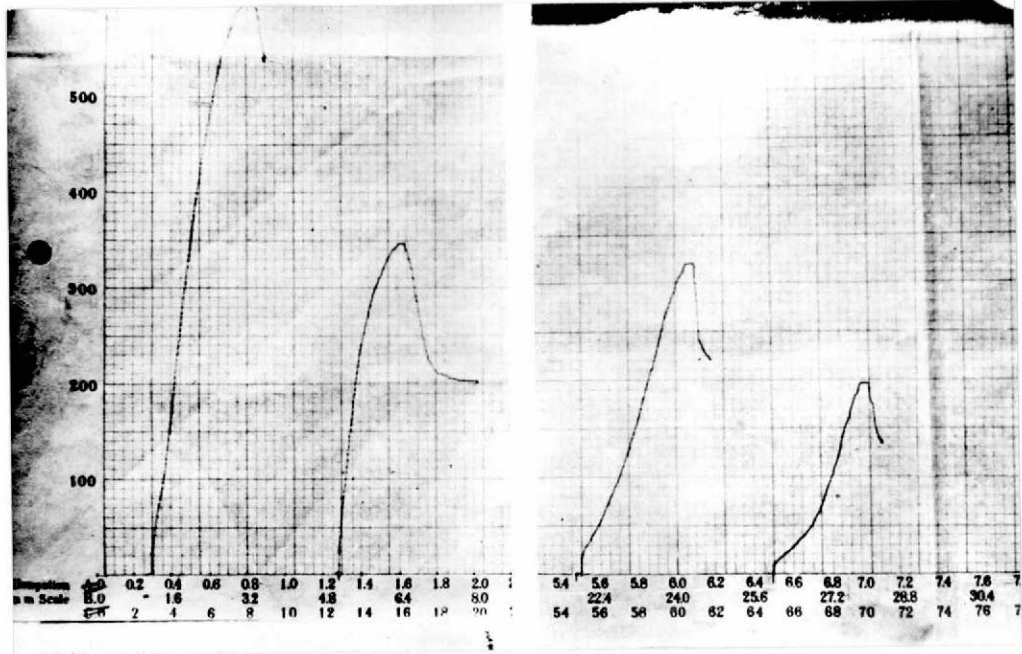


才 37 圖 運動 摩擦 係 數



オ 38 図 圧縮試験における荷重 — 歪曲線例

縦 軸 — 荷 重  
横 軸 — 歪

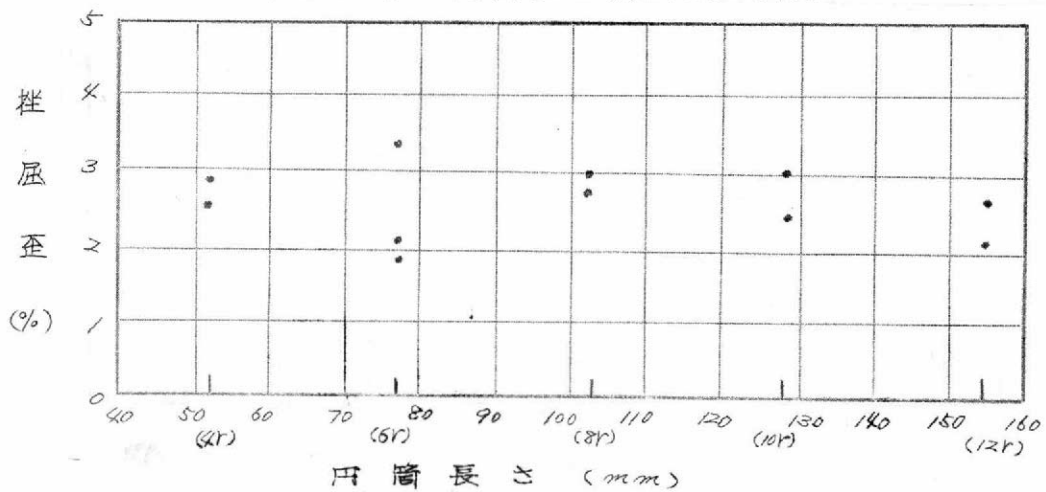


生 紙

油 浸 紙

たとえば、油浸紙円筒オ5表の試料番号 1, 2, 3 に相当するサンプルを、長さ 4r ~ 12r 迄変化させた場合の挫屈限界歪は下図の通りであり、この範囲に於いては長さに関係と考えてよい。

オ 39 図 円筒長と挫屈歪の関係



### 2.3.5 内部に心線のある場合の絶縁紙円筒の軸方向圧縮

今迄述べて来たものは、絶縁紙のみの空円筒である。しかし実際のケーブフルにはかならず内部に撚線を有し、撚線のヤング率は紙より大きいので、これがどのような影響を与えるかを見るため、内部に心線のある場合を実験した。軸方向圧縮試験は曲げの場合の現象を推定するのが目的であつたが、撚線の場合は *Birdcaging* を起して曲げを推定する試料にならないので、空鉛管を用い、その上に紙巻して試料を作成した。内部鉛管は紙円筒の挫屈歪以下では挫屈しない厚肉のものを使用した。

(内径 15 mm、外径 22.3 mm  $k_p = 0.39$  挫屈歪約 8%.)

生紙および油浸紙での実験結果をオ8表およびオ9表に示す。さらにこれを油浸紙空円筒の場合と比較してオ40図、オ41図に掲げる。

生紙の場合は、内部心により挫屈歪が向上しないが、油浸紙の場合は明らかに向上し約2倍の限界挫屈歪を示した。

これは浸漬紙円筒の圧縮挫屈が生紙と異なり、鉛円筒の曲げによる屈服に似た現象を呈する型のもので、内部心の存在により挫屈形式が変わるためであつて、このことは後述の撓り挫屈において示す全く同じ現象によりさらに明らかになると思う。なお油浸紙の場合は外観からの挫屈限界の判別が幾分困難であり、応力をも参考にして判定した。

また、使用した内部鉛管は紙筒に比して遥かに小さい圧縮力で飽和するので、内部に鉛管のある場合の *stress-strain* 曲線は、当然ではあるが生紙、油浸紙ともそれぞれ前述の空円筒の場合の時と同様な特徴ある曲線を示した。

図 40 歪 屈 歪 -  $h/r$  特 性

(内部心ある場合の生紙円筒の軸方向圧縮)

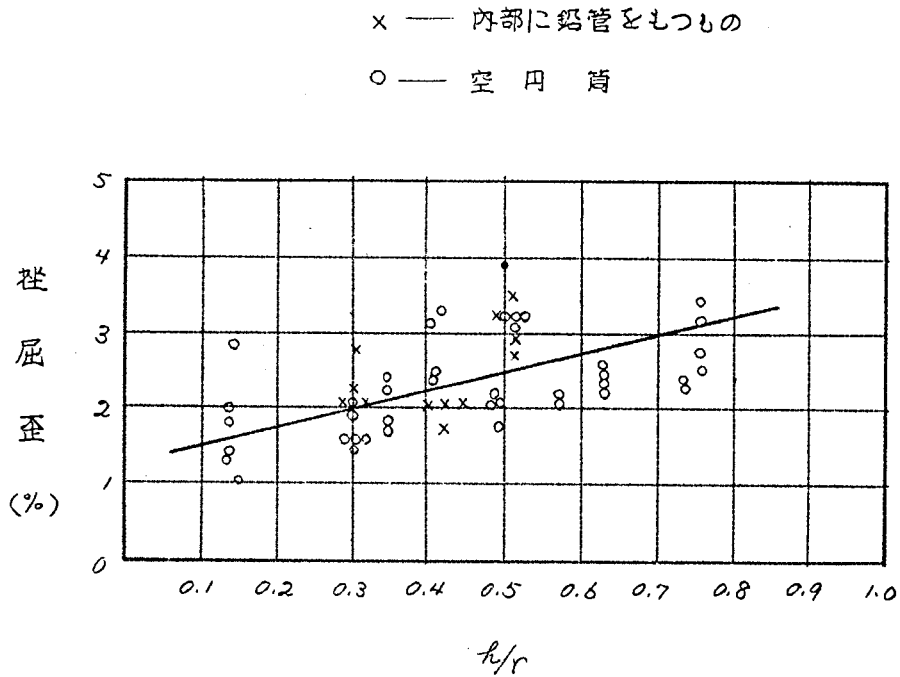


図 41 歪 屈 歪 -  $h/r$  特 性

(内部心ある場合の油浸紙円筒の軸方向圧縮)

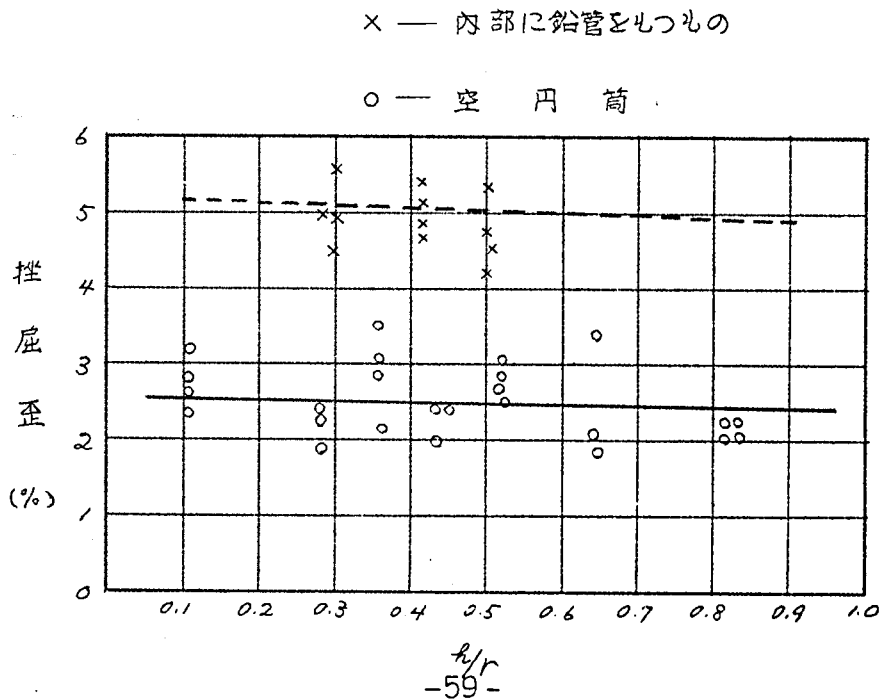


表 8 内部心のある場合の生紙円筒の軸方向圧縮

試料番号	外 径 (mm)	内 径 (mm)	紙 厚 $h$ (mm)	円筒中 心半径 $r$ (mm)	$\frac{h}{r}$	紙円筒 の高さ (mm)	圧縮挫屈歪 (%)
1	37.3	22.3	7.5	14.9	0.503	89	3.
2	"	"	"	"	"	88.5	3.25
3	"	"	"	"	"	89.0	2.75
4	"	"	"	"	"	"	3.5
5	34.0	"	5.8	14.07	0.412	83.0	1.75
6	"	"	"	"	"	83.3	2.0
7	"	"	"	"	"	82.3	"
8	"	"	"	"	"	82.0	"
9	30.3	"	4.0	13.1	0.305	76.2	2.75
10	"	"	"	"	"	76.5	2.25
11	"	"	"	"	"	76.5	2.0
12	"	"	"	"	"	77.6	"

表 9 内部心のある場合の油浸円筒の軸方向圧縮

試料番号	外 径 (mm)	内 径 (mm)	紙 厚 $h$ (mm)	円筒中 心半径 $r$ (mm)	$\frac{h}{r}$	紙円筒 の高さ (mm)	圧縮挫屈歪 (%)
1	37.3	22.3	7.5	14.9	0.503	88.7	4.22
2	"	"	"	"	"	89.2	4.50
3	"	"	"	"	"	88.8	5.35
4	37.0	"	7.3	14.8	0.493	89.2	4.76
5	34.0	"	5.8	14.07	0.412	82.2	5.35
6	"	"	"	"	"	82.4	4.85
7	"	"	"	"	"	82.0	5.09
8	"	"	"	"	"	83.7	4.78
9	30.3	"	4.0	13.1	0.305	77.8	4.5
10	"	"	"	"	"	75.6	4.96
11	"	"	"	"	"	76.3	5.57
12	"	"	"	"	"	76	4.93

### 2.3.6. ケーブル絶縁紙円筒の曲げ

今述べた生紙、乾紙、油浸紙円筒の場合の軸方向圧縮挫屈とこれら円筒の曲げ挫屈との関係は、金属円筒の場合と同様に考える。

心線を有する油浸絶縁層の圧縮挫屈歪は、生紙に比し2~3倍高い。従つて乾紙および油浸紙状態のケーブルの曲げでは、生紙の場合に比して挫屈散が起き難いことは容易に推定される。事実、乾紙および油浸後のケーブルには挫屈は生じにくい。また、内外の多くの文献も乾燥前の取扱いが主因であることを報告している。油浸後のケーブルに見られるものは、大部分は油浸前に生じたもので、曲げによりこの皺が多少発達することはあつても、普通の取扱いであらたに生じることは少い。その上乾紙ケーブルでは、曲げによる紙の切断を防止する意味で大きなドラムを使用し、(ただし、OFケーブル以外では乾紙状態のケーブルに曲げをあたえることなく、乾燥后そのまま含浸される。) また油浸ケーブルでは必ず被覆層を施して后ドラムに捲取られ、被覆層により曲げを制限されるので、この章では生紙円筒の曲げについてのみ扱うこととする。

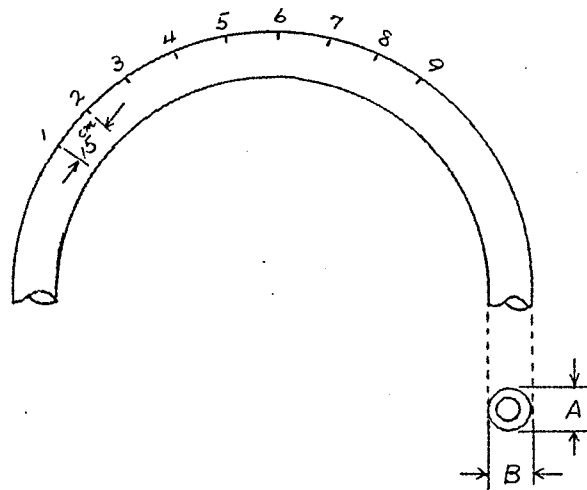
生紙円筒では軸方向圧縮試験から撓線があつてもなくても曲げによる挫屈条件は変わらないことが推定されるので、両者の曲げにつき実験を行った。試料の長さは約5mとし、紙捲条件は圧縮実験と同一である。紙円筒の中心軸に平行になるごとく鉛筆で筋を入れ、曲げの際挟らないように充分注意した。1回曲げに要した時間は大体1分である。

#### 1. 紙円筒の曲げ

試料は外径40.3 mm 内径18 mm、紙厚1.18 mmの紙円筒を用いたが、このように長いケーブルから撓線を抜きとることは相當の困難があつた。下記の円板に沿つて曲げ、15 cm ほどの各点につきA, Bの外径(オ42図参照)をノギスで測定し、その時の円

筒の状態を観察した。

オ 42 図 橋円変形測定位置



(a) 半径 900mm の円板に曲げた場合

測定位置	A (mm)	B (mm)
1	40.6	40.6
2	40.5	40.2
3	40.5	40.1
4	41.1	40.5
5	41.2	39.3
6	40.6	40.0
7	40.6	39.7
8	40.6	39.7
9	40.5	39.4

橋円変型せず捩屈も起きなかった。

(b) 半径 725 mm の円板に曲げた場合

測定位置	A (mm)	B (mm)
1	41.0	40.6
2	40.8	40.1
3	40.5	40.0
4	41.1	40.1
5	41.2	39.2
6	40.8	40.0
7	40.6	40.0
8	40.6	39.9
9	40.6	40.0

楕円変形せず挫屈も起きなかつた。

(c) 半径 575 mm の円板に曲げた場合。

測定位置	A (mm)	B (mm)
1	40.1	40.0
2	41.0	39.9
3	40.6	40.0
4	41.5	40.0
5	41.5	39.2
6	40.6	40.0
7	40.5	40.0
8	40.8	39.3
9	40.9	39.9

楕円変形せず数箇所いつせいに挫屈した(お43図

参照)



過去に積層円筒、直交異方性円筒でも曲げ挫屈実験が行われた例は見当たらないが、生紙の場合は上述の如く楕円変形屈服をせずに局部挫屈をなし、その様式は圧縮挫屈の時と同様である。

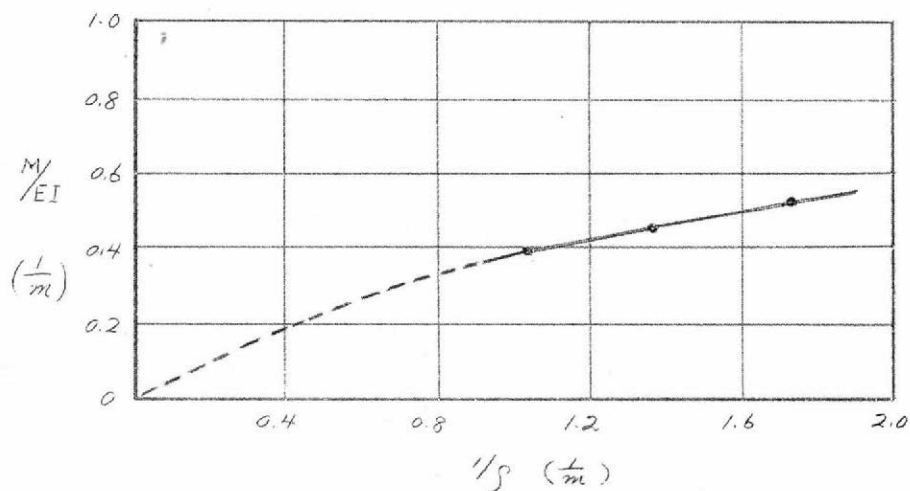
オ 4 3 図 紙円筒の曲げ挫屈



第 44 図は上記実験における塑性特性を  $M/EI - \frac{1}{\rho}$  曲線で示した。

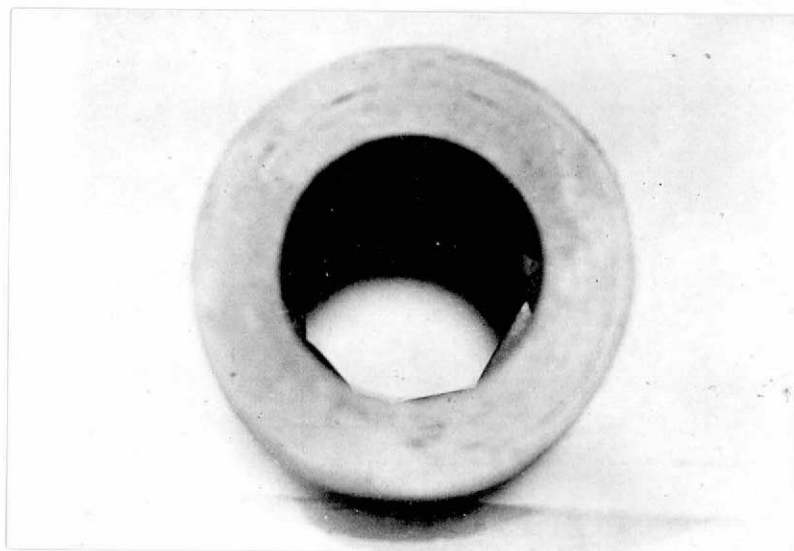
( $M$  : 曲げモーメント  $EI$  : 曲げ剛性  $\rho$  : 曲率半径)

オ 4 4 図 紙円筒の曲げにおける  $M/EI \sim 1/\rho$  特性



オ 45 図には、曲げにより挫屈した紙円筒の内部を示すが、内部変形の方が大きく、かつ、紙テープのスパイラルに沿って発生することも紙円筒の軸方向圧縮の時と同様である。

オ 45 図 曲げ挫屈を生じた紙円筒断面



この紙円筒を半径  $R$  の円板上に曲げた場合、円筒中心軸から最も遠い部分に受ける歪  $(r + \frac{t}{2}) / (R + r + \frac{t}{2})$  が軸方向圧縮時の歪に等しい時に (オ 30 図の実測値の平均を取った。  $\frac{t}{r} = 0.767$   $\epsilon = 3.1\%$ ) 挫屈を起すと仮定し算出せる円板半径  $R$  は  $630 \text{ mm}$  となる。

従つて、この実験結果より軸方向の圧縮歪と曲げによるそれとは実用の範囲では大体一致する。しかし限界圧縮量以下の大なる径に屈曲する場合も不均等なる曲げにより部分的に大なる曲率に曲げた時はもちろん挫屈する。

## 2. 紙ケーブルの曲げ

外径  $40.3 \text{ mm}$  内径  $18 \text{ mm}$  紙厚  $11.15 \text{ mm}$  の紙ケーブルを  $15 \text{ cm}$  ごとに番号を付し下記の円板に沿つて曲げ、前項同様 A、B の外径を

ノギスで測定しながらケーブル表面状態を観察した。実際のケーブルでは生紙のまゝで曲げることは1~2回で、鉛被覆のように繰返し曲げを受けることはないが、繰返しにより変形し、皺が出やすくなるかどうか調査した。

(a) 半径 900 mm の円板に屈曲した場合

測定位置	A (mm)	B (mm)
1	40.5	40.0
2	40.2	40.0
3	40.2	40.0
4	40.4	40.0
5	40.2	40.0
6	40.2	40.1
7	40.3	40.0
8	40.2	40.1
9	40.2	40.1

片側5回屈曲するも挫屈発生せず。

(b) 半径 7.25 mm の円板に屈曲した場合

測定位置	A (mm)	B (mm)
1	40.3	40.1
2	40.2	40.0
3	40.4	40.0
4	40.2	40.0
5	40.1	40.0
6	40.2	40.0
7	40.2	39.9
8	40.3	40.0
9	40.2	40.1

片側 / 回屈曲で僅かな挫屈皺とは思われぬものが発生す。

5 回迄皺の状況は変らない。なお、此の径で捲取の時注意しないと部分的に曲率が大となり挫屈する危険がある。

(C) 半径 575 mm の円板に屈曲した場合

測定位置	A (mm)	B (mm)
1	40.4	40.0
2	40.2	39.9
3	40.3	40.0
4	40.2	40.1
5	40.2	40.0
6	40.2	40.0
7	40.1	40.0
8	40.1	40.0
9	40.1	40.0

片側 / 回曲げで挫屈す。2 回目以後挫屈状態がひどくなる。

以上の如く紙円筒の場合は鉛被円筒のように、曲げにより扁平化することなく、円形のまゝ曲げによる圧縮側が局部挫屈を起す、そうして、曲げ半径  $R$  に曲げた時の円筒中心軸から最も遠い部分に受ける歪  $(r + \frac{t}{2})(R + r + \frac{t}{2})$  が圧縮限界歪を越した場合に挫屈するとして実用上充分と思われる。

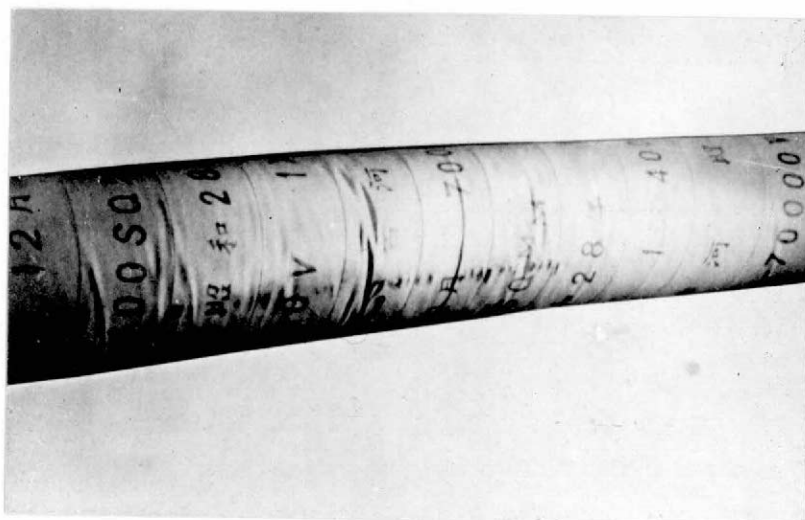
皺の形は積層条件の悪いもの程くたたとえば、ゆるくまいたもの程) 長さ方向挫屈半波長と周方向半波長の比は大きく、積層条件が良くなるにつれ小さくなり、皺の形は  $\diamond \rightarrow \diamond$  に変わって行く。

いずれも、皺は内部迄及んでおり、積層条件の良いもの程挫屈した場合の内部変形は大きい。

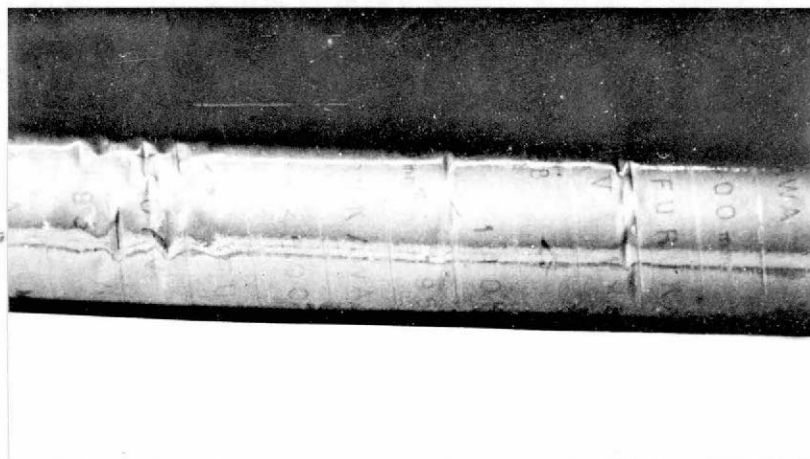
オ 46 図に積層条件の良いものゝ例を、オ 47 図に悪いものの例を示す。

また、オ 48 図に挫屈の内部迄及ぼす変形状況を示す。

オ 46 図 積層条件の良い場合の挫屈皺

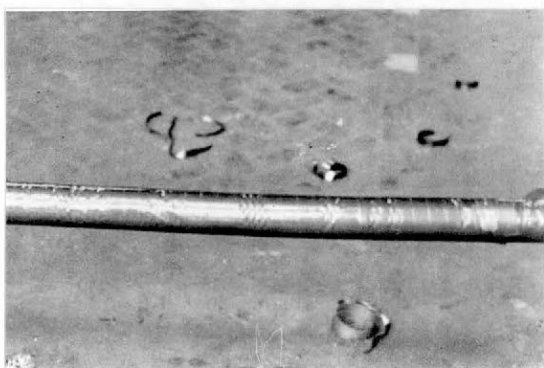


オ 47 図 積層条件の悪い場合の挫屈皺



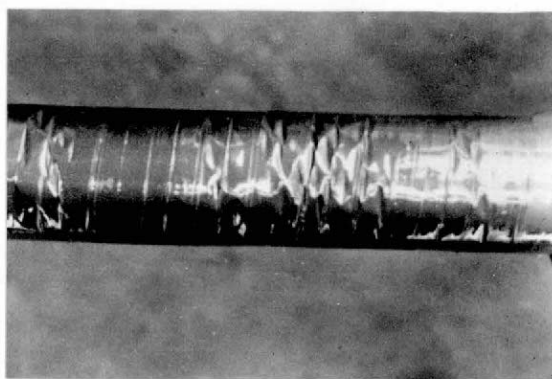
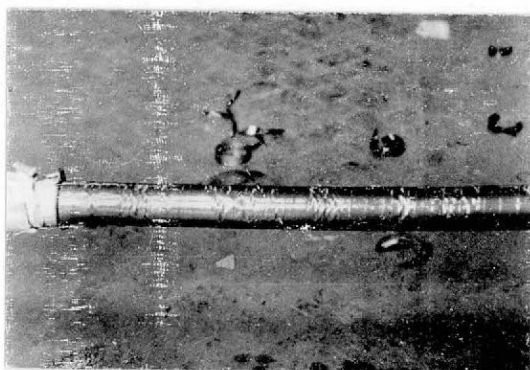
才 48 図 挫屈皺の内部に及ぶ状況

(a)



外 側

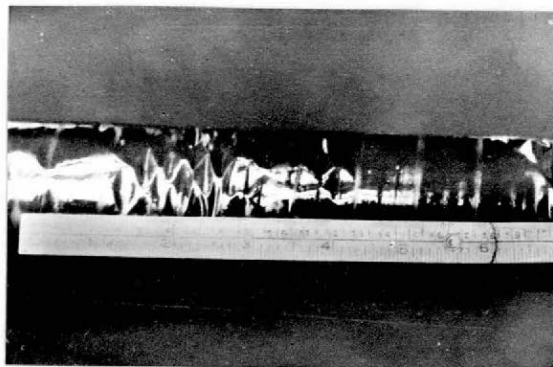
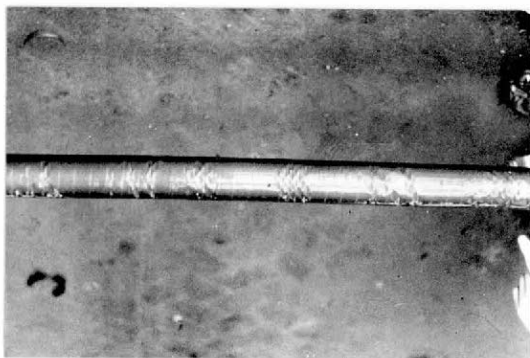
(b)



(b')

左 捻 大

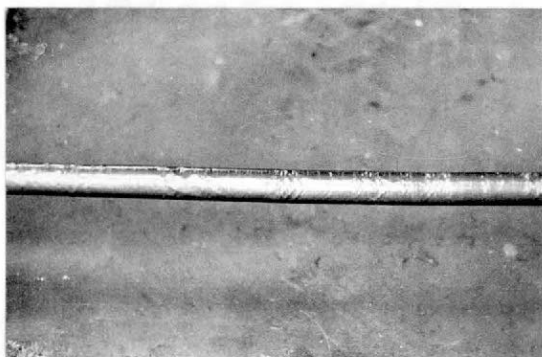
(c)



(c')

左 捻 大

(d)



内 側

つぎに、平均半径  $r$ 、肉厚  $h$  なる ケースル を 胴半径  $R$  なる ドラム に 巻いた時の歪

$$\varepsilon = \frac{r + \frac{h}{2}}{R + r + \frac{h}{2}}$$

が 30 図の 挫屈歪 (平均値) に等しい時の ドラム 歪 / ケースル 歪 を グラフ にすれば、49 図 曲線の 如くなる。

これに 実際の ケースル を 各種 胴歪 の ドラム に 巻き、その 挫屈発生 状況を プロット したが、この 曲線 が 実用上 充分 使用 出来る ことが 判明 した。金属 円筒 の 場合は 曲げ の 挫屈歪 の 方が 大きく、安全 サイド に 出ると されている が、ケースル 取扱い では 實際上 均等 な 半径 に 曲げる ことの 困難 等で 多少 危険 サイド に 出た。

たゞし、この 場合 の ケースル 製造 条件 は 前記 圧縮 テスト の 紙巻 条件 と ほぼ 等しく 紙厚  $0.125\text{ mm}$ 、張力  $4 \sim 5\text{ Kg}$ 、紙含有 水分 約  $4\%$  (冬期) である。

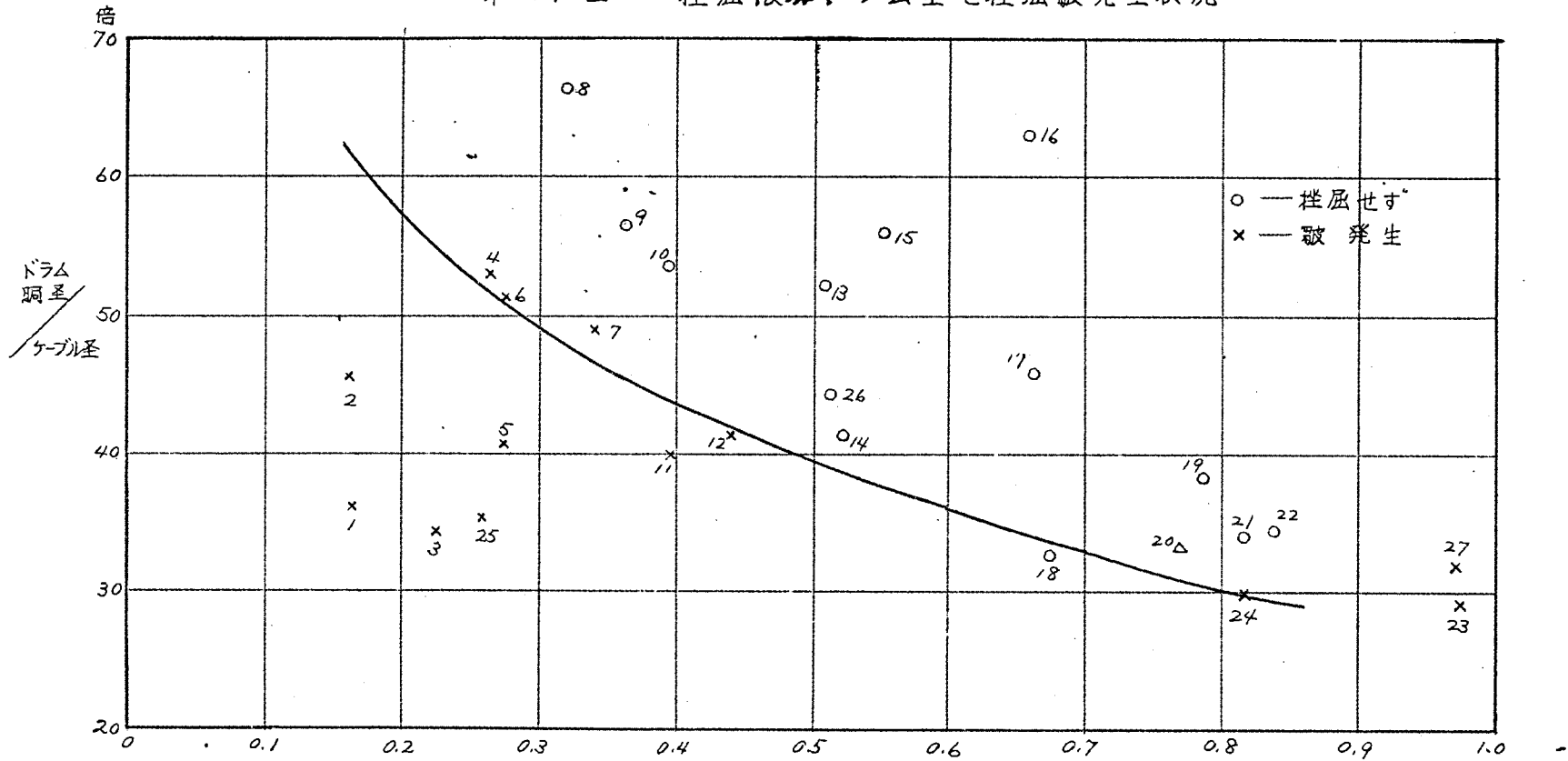
炭紙 の 使用 等 超 高圧 ケースル 技術 の 発展 と ともに 現在 では 張力 を 少くし、かつ 調湿 する 方向 に 進んで おり、それ と ともに 積層 条件 も 変つて 来た が 同様 の 方法 に より、使用 ドラム 寸法 の 規準 が えられる。

なお、低圧 ケースル の 如く 紙厚 の 絶対 値 の 少い もの は、挫屈 発生 の 判別 は 困難 である が、挫屈 変形 量 も 少く、実用上 も 問題 と は ならない。

また、絶縁 層厚 の あまり 大き な もの は 積層 条件 に よつて は、一律 に 整理 する ことは 困難 であり、挫屈 を 完全 に なく する ことも 難しい が、次節 に 述べる 如く、絶縁 層挫屈 の 基本 性質 を 知る こと に より 挫屈 の 発生 を ある 程度 押える ことは できる。

分割 導体 の 如く、導体 が 各 セグメント ごと に 移動 し、断面 が 変形 し やすく、また、 $\frac{h}{r}$  も 小さい もの は 挫屈 の 発生 防止 は 困難 であり、60

第49図 挫屈限界ドラム径と挫屈皺発生状況



(註)

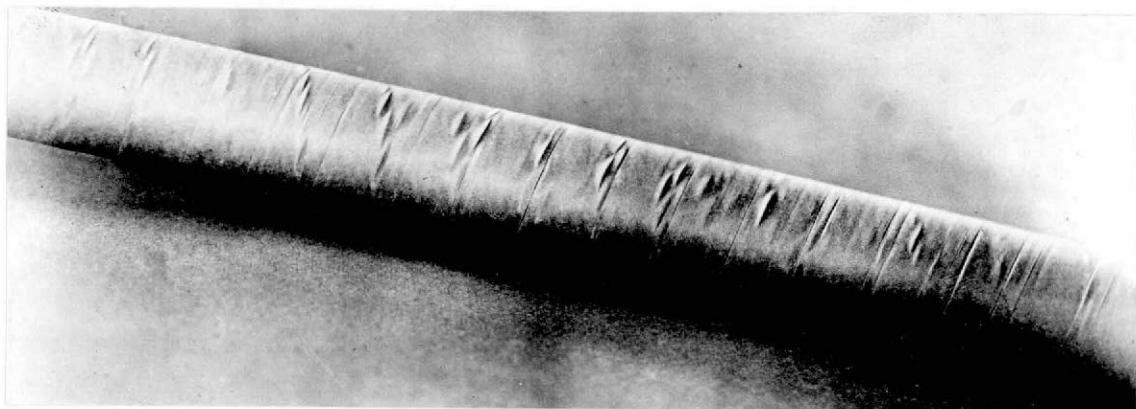
- |                                  |                                 |                                   |   |   |
|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|
| 1. 10KV 1,300 mm <sup>2</sup> 分割 | 7. 20KV 500 mm <sup>2</sup> 分割  | 13. 20KV 200 mm <sup>2</sup> SL   | 19. 60KV 80 mm <sup>2</sup> コットレル             | 23. 220 <sup>KV</sup> 200 mm <sup>2</sup> OF 試作 |
| 2. " "                           | 8. 11KV 250 mm <sup>2</sup> SL  | 14. 60KV 3X300 mm <sup>2</sup> OF | 20. 220KV 200 mm <sup>2</sup> OF 試作           | 24. 154 <sup>KV</sup> 200 mm <sup>2</sup> OF    |
| 3. 20KV 1,300 mm <sup>2</sup> 分割 | 9. 10KV 200 mm <sup>2</sup> SL  | 15. 20KV 150 mm <sup>2</sup> SL   | (オ-工程) (オカミ発生、挫屈で<br>はないと思われる)                | 25. 20KV 1000 mm <sup>2</sup> 丸                 |
| 4. 10KV 500 mm <sup>2</sup> "    | 10. 20KV 325 mm <sup>2</sup> SL | 16. 20KV 100 mm <sup>2</sup> SL   | 21. 154KV 200 mm <sup>2</sup> OF 試作           | 26. 154 <sup>KV</sup> 200 mm <sup>2</sup> OF 試作 |
| 5. 20KV 850 mm <sup>2</sup> "    | 11. 60KV 500 mm <sup>2</sup> OF | 17. " "                           | 22. 60 <sup>KV</sup> 3X100 mm <sup>2</sup> OF | (オ-工程)  |
| 6. " "                           | 12. 70KV 400 mm <sup>2</sup> OF | 18. 60KV 3X150 mm <sup>2</sup> OF |   | 27. 154 <sup>KV</sup> 200 mm <sup>2</sup> OF 試作 |
|                                  |                                 |                                   |   | (セグメント)   |



KV以上のケーブルに使用する場合は絶縁厚の面でも考慮されているのが普通である。

※ 50 図に分割導体の挫屈状況を示す。

※ 50 図 分割導体ケーブルの挫屈皺



また、ベルトケーブルの場合のベルト絶縁層もこれと同じ原因で挫屈皺を完全に除くことは困難であり、Hケーブル、S.Lケーブルへの発展を促した理由の一つとなつてゐることは周知のことである。※ 51 図に *Dunsheath* 氏のこれに関する文献から転載したベルト紙の挫屈皺発生状況を示す。<sup>(21)</sup> *Dunsheath* 氏は 33000 V ベルトケーブ

※ 51 図 ベルトケーブルの挫屈皺

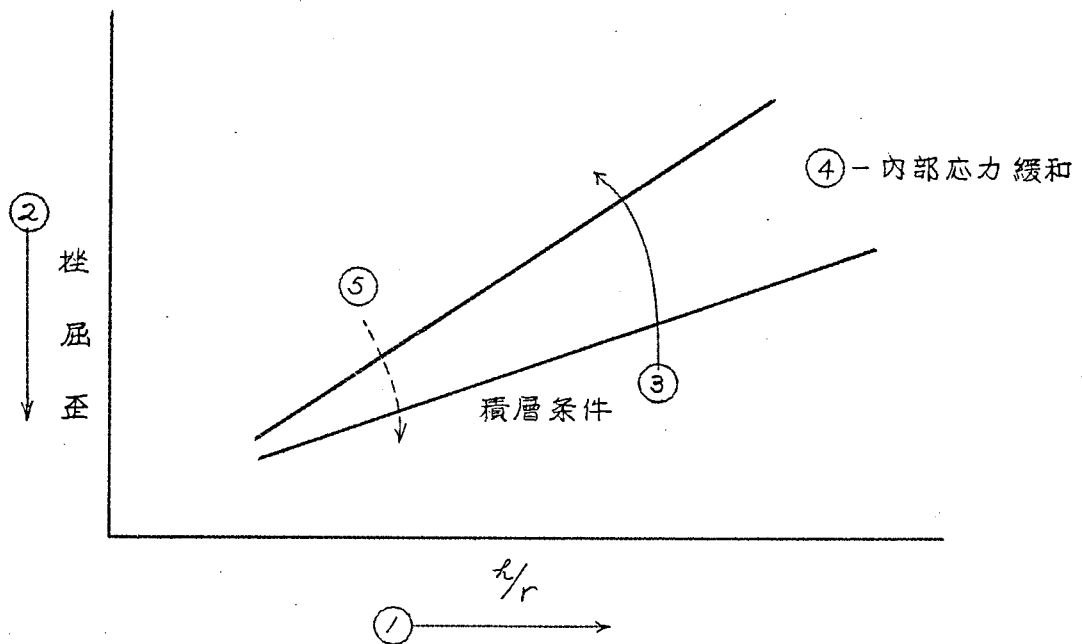


ル事故の大部分は大導体のものであつたことをのべているが、今述べて来たところにより説明できる。

### 2.3.7. ケーブル 生紙 絶縁層の曲げ挫屈特性の向上について

ケーブル絶縁層（生紙）の場合はケーブル鉛被と異なり挫屈変形を多少変えることができる。前述の実験に工程実験の結果を加えて得られた結論はつぎの如くである。

才52図 挫屈変形を向上させる方法



すなわち、この挫屈変形を変えるには下記の5通りの方法が考えられる（才52図参照）

1. ケーブル絶縁層の  $r/r$  を大きくする。
2. 曲げにより受ける歪を減ずる。
3. 絶縁層の積層条件を良くし挫屈歪を上げる。
4. 生じた挫屈変形を直す。（内部応力緩和による）
5. 積層条件を悪くし、挫屈変形様式を変えるか、内部変形量を減ずる。

## 1. ケーブル絶縁層の $t/r$ を大きくすることについて

$t/r$  の小さいものが挫屈皺を発生しやすいことは、常に経験しているところである。

$t/r$  の比はケーブルの電圧 導体サイズで定まるもので、ケーブル絶縁設計により決定されるが、機械的特性も当然考慮に入れるべきである。

なお、この場合  $t/r$  を大きくすることにより 挫屈特性に効果のあるのは  $t/r$  で整理できる範囲のことで、前章迄に述べた積層条件（試料作成条件）では  $t/r$  が 0.8 程度迄含みえたが、積層条件が低い場合（たとえば、緩くまく場合）にはこの範囲は少くなり、それ以上では個々の紙層の挫屈となる。従つて、厚み  $t$  の効果が減少し、かえつて厚みの増すことにより円筒中心半径  $r$ （この場合は絶縁半径とする方が正しい）が増加し挫屈条件は低下する。

超高压ケーブルで挫屈発生を完全になくすることが困難なのはこのためである。

## 2. 曲げにより受ける歪を減ずることについて

曲げ歪および曲げ回数を少なくすることにより挫屈変形を減らし得ることは当然である。しかし、機械設備を大きくすることは経済的理由により制限を受ける。

圧縮実験の結果からは捲取りスピードによつてもわれわれの取扱いうる範囲内では挫屈歪は変らない。

また、捲取時の歪の大きさを減らすとともに、捲取りによる歪を受ける回数を減ずることも必要である。キャプスタンを廃してキャタピラー装置とし、また直接乾燥ドラムに捲く等はこの線に沿つたものである。

最近ケーブル大型化とともに国内<sup>各</sup>メーカーとも設備更新に努めているが、英国の *Pirelli general Cable Co.* が有名な *Canada Kemano* の 300 KV ケーブルをつくる際、挫屈をへらすため、つぎの設備を作ったことを発表している。<sup>(22)</sup>

- |               |   |               |
|---------------|---|---------------|
| a. 紙巻ヘッドの増設   | } | ----- 曲げ回数の減少 |
| b. キャタピラー設備   |   |               |
| c. 捲取スタンド新設   |   |               |
| d. 工場用大型ドラム新調 | } | ----- 曲げ歪の減少  |
| e. 大型乾燥巻設備    |   |               |

### 3. 絶縁層の積層条件を良くし挫屈歪を上げることについて

積層条件の良い場合には、さらに積層条件をあげて等方円筒の挫屈歪に近づけうる。すなわち、内部燃線により特性の向上しない弾性域挫屈に近い範囲についてである。しかし紙筒の壁厚や材質（水分、紙質）がこの範囲にどのような影響を与えるか未だ明らかでない。積層条件をあげるには次のものを考えられる。

#### (a) 硬く捲くこと *Emamueli* 氏 *Scott* 氏 *Wyatt* 氏

を始めとして、挫屈を除くには硬く捲くことがオーであると、発表しているものは極めて多い。<sup>(23)</sup> 事実、初期の紙ケーブルは弛く捲いたため、挫屈皺を生じ、絶縁特性を害したので、この点改良せられて来た。

しかし、欠点としてはケーブルの可撓性を損じ、曲げの際、紙が切れやすくなる。従つてケーブルの絶縁層以外の構造および取扱条件をも考慮して紙巻張力を定める必要がある。

#### (b) 調湿した紙を用いること。

*Anaconda*, *Simplex* の資料を始め調湿が有効であることの発表は非常に多いが、<sup>(24) (25)</sup> これは最も効果がある。

本章 2.3.4. ㉔表, ㉔表, に示す如く、紙が水分を有す積層条件に対しては、  
ることによつては摩擦抵抗の増加も少く、直接的な効果はないが、  
二次的に水分により柔軟性を増し、よくなじんで纏巻しやすくな  
り、積層条件をよくするためである。(㉔53図、㉔54図)

しかし、過度の水分は乾燥を困難にし、また、乾燥後の紙間々  
隙を大にし、電気特性を損ずる恐れがある。

なお、調湿紙を用うことは、また、次の 4.5 項に述べる効果  
をも有する。

(c) *Soft paper* を使うこと。

これも調湿と同じく纏巻時なじみやすい点で、二次的な効果が  
考えられる。しかし一般には気密度が低下し、インパルス耐圧が  
低下する等の問題がある。

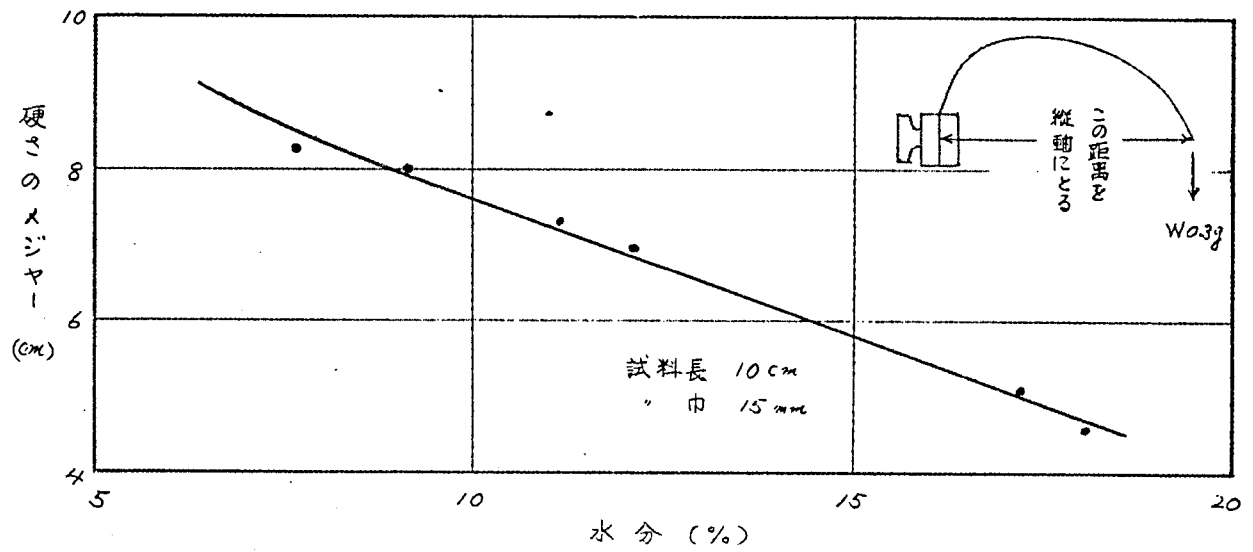
(d) 紙厚の大なるものを使うこと。

一般に紙厚の大なるものは抄紙技術上柔軟性が大となる。また  
積層の個々の紙層は局所的に積層条件を良くしたことになり挫屈条  
件が向上する。しかし、纏巻しにくく、かえつて積層条件を悪く  
する危険がある。近時導体近傍の紙厚を減じ電気特性を向上させ  
ることが行われているが、前述の *Kemano 300 KV* ケーブル  
は紙厚の大なるものを使用し ( $0.09\text{ mm}$  および  $0.19\text{ mm}$  の二種類  
のみを使用) 好結果をえている。

(e) 紙テープの *gap* を小にするか、紙巾を大として、紙の占積率  
を上げ、見かけ上の積層条件をあげること。

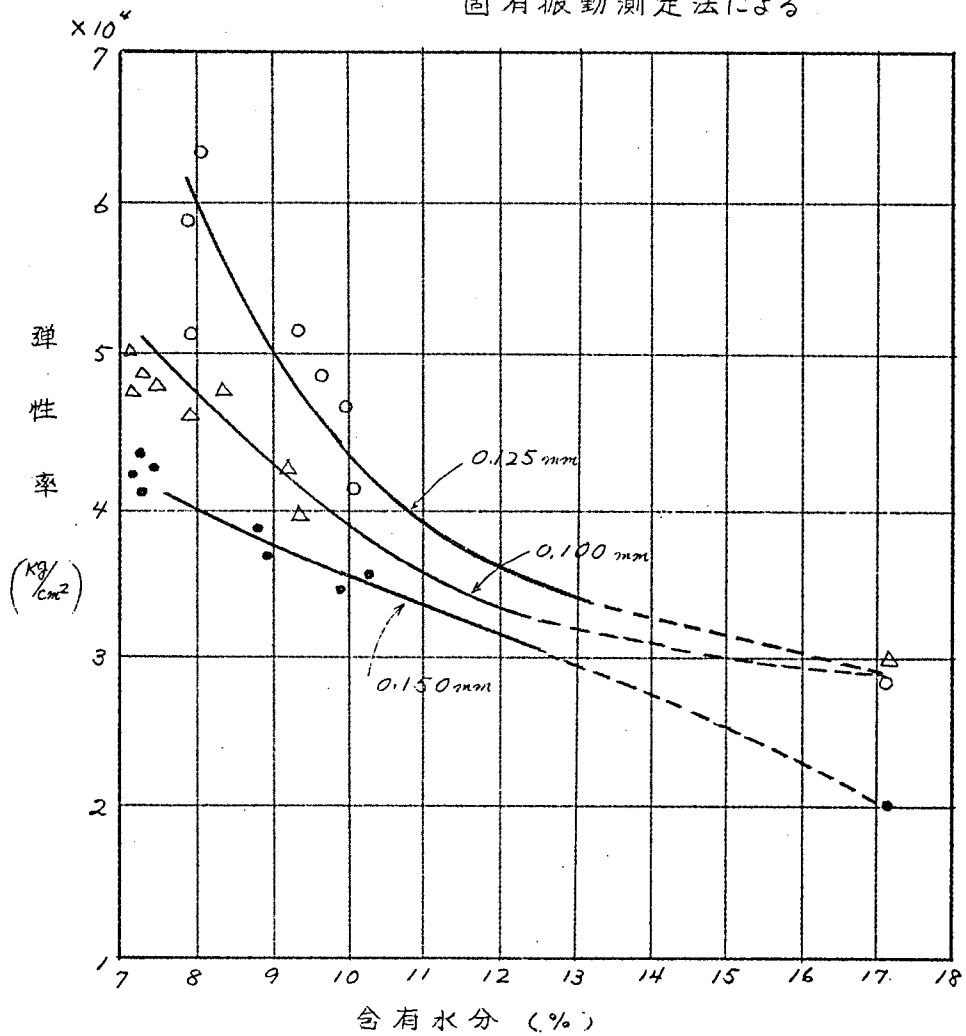
われわれの実験では特に *gap* を大にしたもの ( $3\text{ mm gap}$ ) は  
極端な挫屈を示した。しかし *gap* を極端につめることは曲げの  
際、オガミ等の現象を起す。

才 53 図 水分と硬さの関係



才 54 図 水分と弾性率の関係

固有振動測定法による



また、紙巾の特には小なる時は見掛け上の積層条件を悪くし、挫屈し  
やすい。しかし巾を拡げすぎるとは纏捲時のなじみを悪くし、  
かえって積層条件を悪くする。従つて紙巾も纏捲性、紙切れ等か  
ら一般に用いられる範囲を変えることは難しい。

#### (4) 摩擦係数大なる紙の使用

積層条件は上るが、実際の製紙技術、紙切れに及ぼす影響等困  
難がある。

上述の如く色々な方法が考えられるが何れも反面に欠点を伴う。な  
おこの積層条件と挫屈歪向上の関係は紙以外のものも同様で、たと  
えば、二重鉛板が挫屈特性を向上させることには効果がないのはこ  
の理由による。

#### 4. 生じた挫屈変形を直すことについて

絶縁紙は後章に述べる如く、湿気応力によつても挫屈を起す。従  
つて生じた挫屈変形を乾燥工程により僅か乍ら直すことができる。  
これはわれわれがしばしば経験するところであるが、この際乾燥に  
より内部応力を緩和しやすいよう考慮して置くことはできる。

調湿することにより積層条件をあげたものは、この点で二重の効  
果がある。

#### 5. 積層条件を悪くして挫屈変形様式を変えるか、内部変形量を減ずる。

3項の全く逆であるが、どうしても挫屈変形をまぬがれ得ないも  
のは、積層条件を悪くして層としての挫屈から一枚の紙としての挫  
屈に変えることにより変形の形態を変え、部分的に大きな挫屈を  
均等に分散させることもできる。さらにパイプとしての積層条件  
を悪くして乾紙・油浸紙の特性(屈服に近く空筒としての特性は低い  
が、内部芯により向上し、挫屈皺を生じにくい。)に近づける事も  
できる。最近の傾向は張力を弱め調湿を行う方向にあり、又漸次太  
物化してパイプとして取扱いにくくなって居るので屈服しやすい  
様積層条件ならびに、等価ヤング率を下げること(調湿は

この場合も有利)も有効な手段であるが、この点は研究すべきことも、なお多くあり、后日にゆづりたい。

以上挫屈条件を変えることについて説明した。過去に紙皺に關して發表されたものは、原因を把握することなく個々の現象をとらえたものが多かったが、ここに系統的な研究に着手することが出来た。

### 2.3.8. 絶縁層の機械的一様性と電気特性との關係

電力紙ケーブル絶縁層の機械的一様性と電気特性との關係については古くから研究せられているが、複雑な問題であり充分説明されていない。

絶縁層が連続して紙切れを生ずるような場合は論ずる迄もなく、その影響は直接的である。

しかしながら絶縁層として挫屈皺を生ずる場合の影響は、その紙皺の大きさおよび数に關係する問題で一概には断定できない。

多くの文献によれば、ソリッドケーブルの場合はボイド発生的高温となつてケーブルの劣化を早め、OFケーブルの場合も油層厚みを大きくすることとなり、電気特性特にインパルス特性を下げる事が發表せられている。(21)(22)(23)

ケーブル絶縁の破壊機構は複雑で、たとえば相当なる外傷を加えたケーブルの破壊テストにおいても必ずしもその場所で破壊しないような特性をもち、挫屈皺も才48図の如き極端なものは電気特性を下げるが、小さな挫屈皺と電気特性との關係は未だ充分明らかにされていない。

われわれの経験では大きな挫屈皺の反対側は紙テープの外れ、オカ



ミが発生しやすく、これがケーブル破壊点となることがあり、また、大導体のFケーブルの場合は鉛被下の挫屈皺が破壊口となりやすく、カーボン紙または片紙による絶縁遮蔽が採用される理由となつている。

以上の事情から、挫屈皺が生ずる時は全長に亘ることとも相俟つてこれをできる限り除くことが望ましく、現実にも大きな皺を有するものは各メーカーとも、出荷を取り止めている。

また、過去の紙巻技術、巻取り方法等は皺を除き機械的一様性を得ることに終始して発達して来ており、最近超高压ケーブルの出現とともにキャタピラーが使用され巻取機、乾燥器が大型化して来ているのも主としてこのためである。

なお現在、ケーブル設計の基準となつている *Maximum Stress Theory* の反論として、小サイズ導体のものが大サイズのものに比し破壊電位傾度が有意に高いことがよく論議されるが、一般には本節に述べて来た如く絶縁層の機械的特性が導体径に反比例するためであるとして了解されている。

### 2.3.9. 結 言

以上本節においては積層円筒としての絶縁層の曲げの問題を取扱つた。著者は絶縁層が各紙テープ間の積層条件がよいため、円筒としての性質をもつべきであると考え研究を行つた結果、紙皺がその円筒の挫屈であることを見出した。こゝでは生紙、乾紙、油浸紙の各円筒の軸方向圧縮試験、心線を有する場合の特性、曲げ挫屈との関連等基礎的なものから研究を行つた。

すなわち、絶縁層の軸方向圧縮では生紙、乾紙、油浸紙、いずれの円筒も等方質円筒に比し低い挫屈歪をもつ。生紙円筒の挫屈様式は薄肉金

円筒  
層の弾性域挫屈と同様の形式を示し、内部心の存在により挫屈歪は向上しない。乾紙、油浸紙は厚肉金

円筒  
層の屈服に似た現象を示し、生紙の挫屈歪より小さいが内部心により2  
倍程度向上する。また、生紙円筒の場合は、曲げにより屈服することな  
く軸方向圧縮と同形式の局部挫屈をなし、両者の挫屈歪は実用上等しい  
としてよいこと、および曲げの場合も燃線の存在に影響されないことを  
明らかにした。また、これら形式および挫屈歪の大きさは形状によるほ  
か、主として積層条件に基づくことを述べた。

これらにより未乾燥紙においてのみ挫屈問題の存する理由を明らかに  
し、また、従来主として経験に頼っている挫屈皺防止の問題につ  
いてその理論を説明することにより具体的方法を見出し、紙捲方法改善  
に資することができた。

同時にケーフル許容曲げ半径、捲取ドラム半径等の算出基準<sup>の資料</sup>を与えるこ  
とができた。

これら研究は今迄非常に少かつたケーフル絶縁層の機械的特性研究  
の足掛りとなり得ると思う。

## オ3章 電力紙ケーブルに見られる円筒殻の捩りについて

### 3.1 等方性円筒の捩り

#### 3.1.1 緒 言

ケーブルはドラム巻または、コイル巻を行うから製造中必ず捩れる。

特に3心ケーブルでは撚合工程により捩りが加わる。捩りは殆どの場合曲げと同時に受けるので、曲げ変形を助長する意味でも、また、ケーブルの基本的特性を知っておく意味からも捩り特性の研究は重要である。

電力ケーブルにおける等方性円筒には、曲げの項でも述べた如くケーブル被覆および防蝕層があり、いずれもパイプとしての性質を保有する。防蝕層をなすPVCまたは、ネオプレンゴムの円筒は捩りの場合もやはり鉛絞と同じ形式の捩り変形を起すが、前にも述べた如く厚肉であり、また、大きな剪断歪にも耐え得、元に戻した場合回復すること、必ず防蝕層は被覆上に施され、かつ内部心により挫屈限界の向上する型であること等から、これが問題になることはないと考えて良い。

従ってこゝでは主に鉛被について述べる。

#### 3.1.2 ケーブル被覆円筒の捩りについて<sup>(1)(2)(3)</sup>

等方性円筒殻の捩り挫屈の問題も幸いケーブル部門以外で古くから研究されているので、まづこれらを紹介してケーブル鉛絞の捩り特性の理解を助けることとする。

等方性円筒殻の捩り挫屈を最初に研究したのは、E. Schwerin 氏で、その後 Donnel 氏、Lundquist 氏、Segawa 氏等沢山の人が数学的解析および実験的研究を行つている。<sup>(30) (31) (32) (4)</sup>

軸が細長く板厚対半径比が小さい場合には円筒壁面の挫屈波は起らず軸の周りに全体として螺旋形に捩れて挫屈する（周方向波数  $n=1$  の場合）

薄肉円筒では壁面に挫屈波が起り得る。この挫屈剪断応力に関しては多くの人により公式が導かれている。

長い円筒では両端の支持条件には無関係に

$$\tau_{cr} = 0.272 \frac{E}{(1-\nu^2)^{\frac{3}{2}}} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots \text{Donnel 氏}^{(31)}$$

ここに  $\tau_{cr}$  : 挫屈剪断応力

$h$  : 板 厚

$r$  : 中 心 半 径

$E$  : 弾 性 率

$\nu$  : ポアソン比

$$\tau_{cr} = \frac{1}{3\sqrt{2}} \frac{E}{(1-\nu^2)^{\frac{3}{2}}} \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots \text{Timoshenko 氏}^{(1)}$$

$$\tau_{cr} = 0.248 E (1 + 0.45 \frac{h}{r}) \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots \text{Schuerin 氏}^{(30)}$$

$$\tau_{cr} = KE \left(\frac{h}{r}\right)^{\frac{3}{2}} \dots \dots \dots \text{Lundquist 氏}^{(32)}$$

ここに  $K = f\left(\frac{l}{r}\right)$ ,  $l$  - 筒 長

(全く実験的に求めたもの)

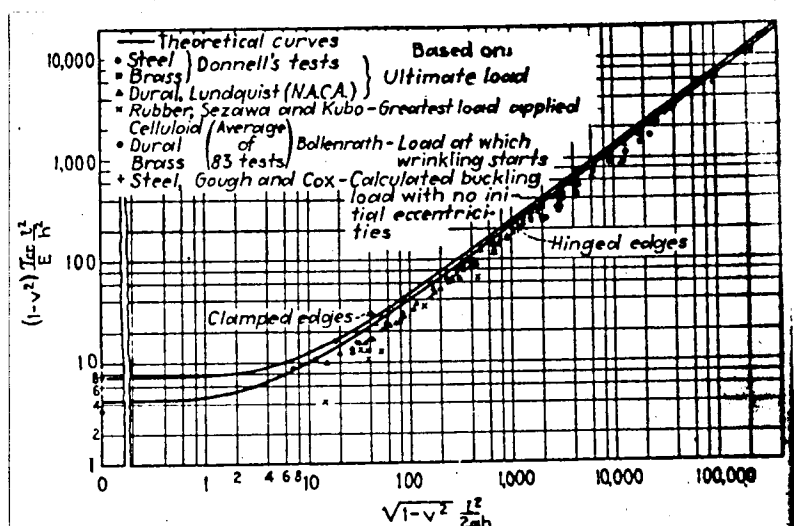
いずれも  $n=2$  の場合であるが、 $n>2$  の場合について計算すると、 $\tau_{cr}$  の値は常に  $n=2$  として求めた結果より大きいので長い円筒殻の場合は  $n=2$  の公式を用うべきである。

(E. Schuerin 氏、W. Flugge 氏等による。(30)(1))

Donnel 氏はかれの筒長の短い場合の実験を Lundquist 氏、Sagawa 氏、Bollenrath 氏、Gough 氏等の実験と一しょにオ 55 図に整理している。横軸に  $\sqrt{1-\nu^2} \frac{l^2}{2ah}$ 、縦軸に  $(1-\nu^2) \frac{\tau_{cr}}{E} \frac{l^2}{h^2}$  (ここに  $l$  は試料長さ)をとつたものであるが、先にオ 11 図に示した曲げの場合の  $E_{cr}$ ,  $\frac{h}{r}$  の関係に相当するもので、換りにおいても、この関係が材料に無関係な一般的関係であり、図のように鋼、ジュラルミン、真鍮、セルロイド、ゴムの如く、若しく材質が異なる円筒においても同一の関係を示したことは興味あることと思う。

なお、これら実験値は筒長の短い場合の計算値よりいずれも小さく出ている。

オ 55 図 円筒の捩り挫屈試験結果



ところでケーブル鉛被の場合も圧縮挫屈および上記筒長の短い時の実験より推して、筒長の長い場合の理論式（弾性域のものではあるが）を挫屈剪断歪と  $(\frac{l}{r})^2$  の関係として表したものに近い値をもつであろうと筆者は类推している。

しかし、筆者の実験では試料長 20 cm ～ 50 cm の長い鉛管においていずれの場合も捩り応力が 1ヶ所に集中して捩れ、自動記録による応力-歪曲線でも明確な挫屈限界は見出せなかつた。

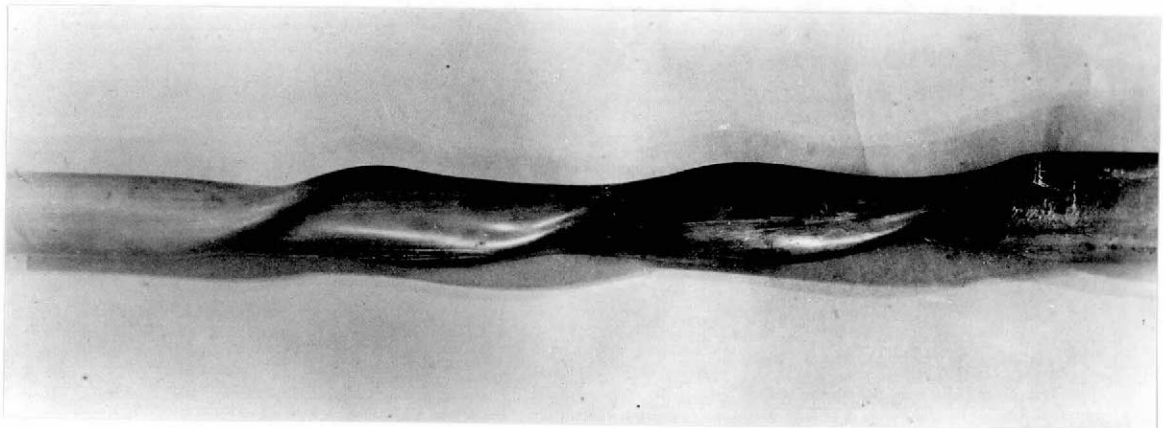
この鉛管の捩れ変形の状況はゴム管を捩った時と同様な変形様式で断面が楕円変形し、ある捩り角度で急激な変形を示す。筆者はこれを鉛管を曲げた時の屈服現象に相当するものとし、従つて内部心により挫屈変形の限界は当然向上すると考えている。

このように長い空鉛管の挫屈限界捩り角度の測定は困難であるが、通信ケーブルでの鉛被捩り実験の結果は鈴木氏によればオ 56 図、オ 57

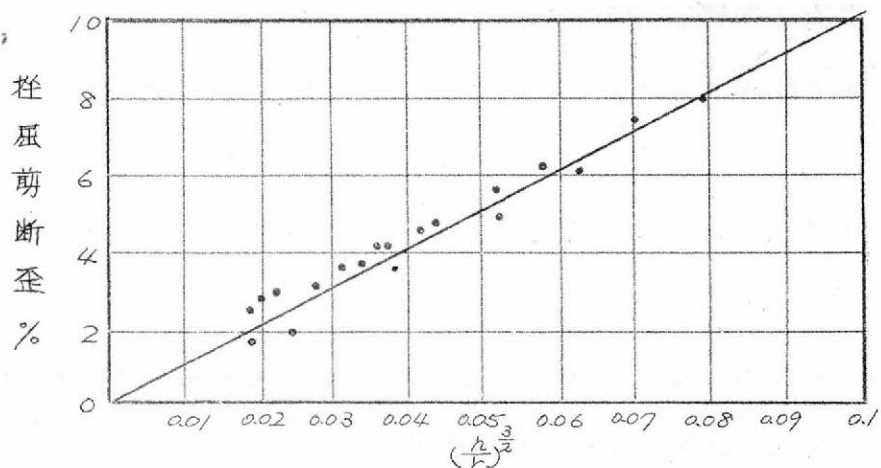
図に示す通りである。<sup>(3)</sup> これは均一に換れるよう、介添えを加えながら実験し、ある角度において鉛被が急に挫屈変形する時の換り角度を測定したものである。

なお、鈴木氏は曲げの時も換りの時も内部心により挫屈歪は向上せず通信ケーブル、電力ケーブルいずれでも空管と同じ歪で挫屈するものとしているが、空鉛管の変形様式、前記の理論式および前節の曲げにおける結果から見て内部心の存在により断面の橢円化を防ぎ、オ57図の値は空鉛管における限界値より相当大きな値が得られていると思う。

オ56図 鉛被の換り挫屈



オ57図 鉛被挫屈剪断歪  $-(\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$  特性



つぎに固い内部コアを有する電力ケーブルの場合の挫屈値は楕円断面化しないので、さらに高くなる。

筆者の実験では長さ 50 cm の各種試料をオグク図の挫屈歪以上扱っても、鉛被表面に一樣なザラツキを生じ、扱い角に応じた線跡(被鉛機ダイスによる縦筋が扱れたもの)は鮮明に出るが、扱い挫屈は認められなかった。(ただし、内部コアは挫屈している。)

また、応力-歪曲線は内部コアの扱い挫屈による変動点(一般にはこれも不明瞭である。)を示すのみで、これにより挫屈を確認することもできなかった。

これは油浸紙円筒での鉛被のある場合(後節 3.3.5)に詳しく述べるが、電力ケーブルの場合、鉛被の扱い挫屈限界は内部コアのそれよりも高いので、曲げの場合と異なりこれにより制約を受ける恐れのないことを証明している。

### 3.1.3 扱いと曲げの共存する場合について<sup>(2)</sup>

前項に述べた如くケーブル被覆の扱いは内部心の扱いに比して重要でない。ただケーブルの曲げによる変形を助長する意味においてのみ考慮して置く必要がある。

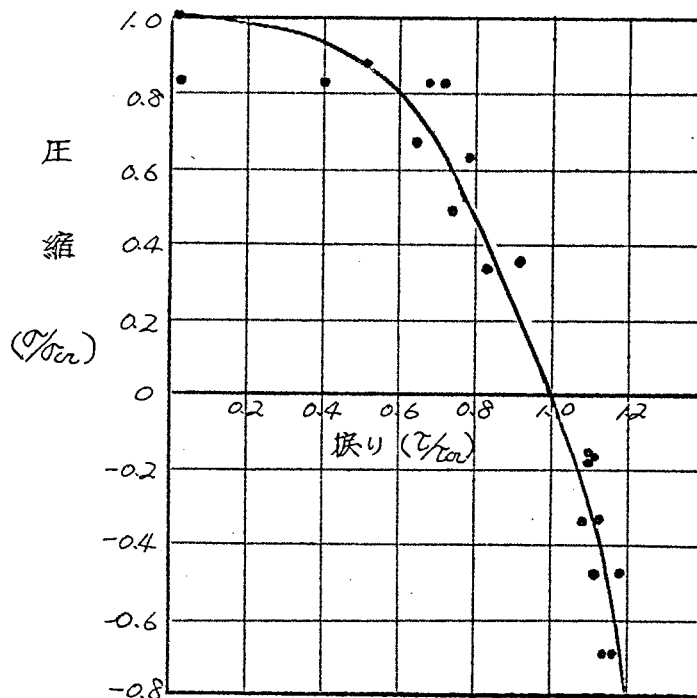
電力紙ケーブルでは鉛被の扱い挫屈の限界の判定が困難であり、扱い、曲げ共存の実験も出来なかった。

しかし鉛被に留めてだけではケーブル以外の等方性円筒の問題と同様であり、この曲げ、扱い共存の場合の研究はほとんど行われていないが、その基礎となる圧縮と扱い共存の場合については研究されているので、これにつき説明する。

扱いと圧縮共存の場合については、Bridget 氏、Ballerstedt 氏、Heck 氏等の研究がある。(33)(34)(35)

F. J. Bridget 氏<sup>等</sup>によれば等方性完全円筒殻が軸圧のみを受ける時の挫屈応力を  $\sigma_{cr}$ , また、捩りのみを受ける時の挫屈剪断応力を  $\tau_{cr}$  とすれば、軸圧応力  $\sigma$  のおよび捩り応力  $\tau$  を同時に受けて挫屈する時の  $\frac{\sigma}{\sigma_{cr}} \sim \frac{\tau}{\tau_{cr}}$  曲線はオ 58 図の如くである。(33)

オ 58 図 捩りと圧縮による挫屈限界



また、O. S. Neck 氏, H. Ebner 氏によればつぎの如くである。(34)

$$\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^3 + \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = 1$$

これは前記オ 58 図に非常に近い。

W. Ballerstedt 氏, H. Wagner 氏の実験では

$$\left(\frac{\tau}{\tau_{cr}}\right)^2 + \frac{\sigma}{\sigma_{cr}} = 1$$

と発表されている。(35)

また、鈴木氏は鉛の空管の場合について



$$\left(\frac{\theta}{\theta_{cr}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cr}}\right)^2 = 1$$

ここに  $\varepsilon$  : 圧縮歪

$\theta$  : 捩り角度

が成立することを実験により確かめている。<sup>(3)</sup>ただし  $\theta_{cr}$  は前記通信コア一のあるものを取っている。

鉛円筒は内部心により曲げ、捩りとも圧屈限界を向上させる型であるので、電力ケーブルの場合はそのまま上記の関係をあてはめることは難しいが、ほぼこのような関係にあると推断してよいと考える。

### 3.1.4 結 言

本節においては等方性円筒であるケーブル被覆が捩りを受けた場合につき記述した。鉛被は曲げの場合と同様橢円断面化する型の圧屈形式をとることから内部心により圧屈限界を高めることを説明し、従来の説の如く圧屈限界は内外構造物に影響されないとは考えられないことを述べた。

また、電力紙ケーブル被覆は内部コアに比して捩り圧屈限界が高く、これにより取扱いを制限されないことを述べた。ケーブル被覆では大きな捩り歪を何回も繰返し受けることはないので、皺として発達する恐れもなく、その捩り特性は曲げ変形を助長させること以外には実用的意味は少ないが、ケーブルの基礎特性の一つとして説明した。

### 3.2 異方性円筒の捩り<sup>(36)</sup>

先に述べた如く電力ケーブルに見られる異方性円筒としては絶縁層円筒、溝付鉛円筒、波付アルミ円筒がある。

絶縁層は前と同じく積層円筒として別に扱いたい。溝付鉛被はその用途から考えて燃合されることはなく、また、波付アルミ被も等方性円筒に比して見掛け上の肉厚が大きくなるので、これら被覆を施して后燃合せすることは不利であり、燃合せを行う可能性はほとんどない。従つて大きな捩りを受けることはないと考えて良い。

しかし曲げ変形を助長させる点で一応の考慮を払うべきであると考えるので、今迄研究されているものについて簡単にのべる。

なお、これらは次節の絶縁層積層円筒の基礎となるものであり、積層円筒は数学的解析が困難であるので、その点からも過去の異方性円筒の研究を知つて置く必要がある。

異方性円筒の捩り挫屈については林氏、井上氏、E. Schapitz 氏、山名氏等の研究がある。林氏は等方性円筒に関する Donnell 氏の結果を微小変形理論にもとづき直交異方性円筒に迄拡張した。<sup>(36)</sup>

すなわち、一様材厚、一様板厚の長い円筒の挫屈剪断応力は

$$\tau_{cr} = 0.272 \sqrt[4]{E_1 E_2^3} \cdot \left(\frac{h}{r}\right)^2$$

ただし  $n=2$  ( $E_1, E_2$  は前章 2.3.2 参照)

$\tau_{cr}$  を高めるには周方向弾性率を高めるのが有効である。

直交異方性円筒の実験には、山名氏の波板円筒と井上氏の合板円筒に関するものがある。<sup>(37)(36)</sup> 前者の挫屈剪断応力は理論式の約 92%、后者は約 60% であつた。

異方性円筒の実験はバラツキも大きく、困難が多くて研究もあまり行われていないが、これは今迄扱われたものは合板、細いピッチの波板等で一様な異方性を得ることが難しく、また、種々な形状の円筒試料を入手することが困難であつたためである。

### 3.3 積層円筒の捩り<sup>(27)(28)(29)</sup>

#### 3.3.1 緒言

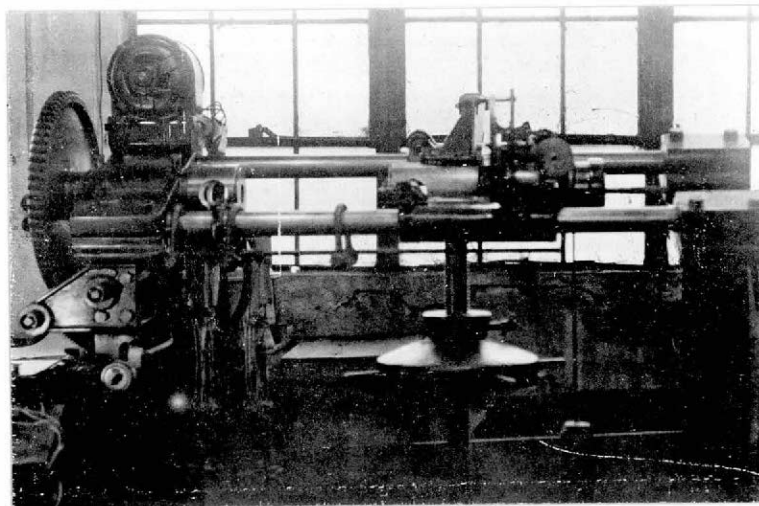
ケーブル絶縁層円筒の捩りは特殊の場合の他は障害として現われることがないので、なじみも少くその特性は殆ど知られていない。しかし、生紙の場合は捩り挫屈を生じ易い扇形絶縁層の基本となり、また、油浸紙の場合は一旦挫屈が生じた時には曲げ挫屈<sup>28</sup>以上に電氣的弱点となる。

電力紙ケーブルは乾紙の状態では大きな捩りを与えることはない。従ってここでは生紙絶縁層と油浸絶縁層についてのみに取扱った。

#### 3.3.2 生紙円筒の捩り試験

生紙円筒の捩り実験はオ 59 図に示す試験機で行った。

オ 59 図 捩り試験機



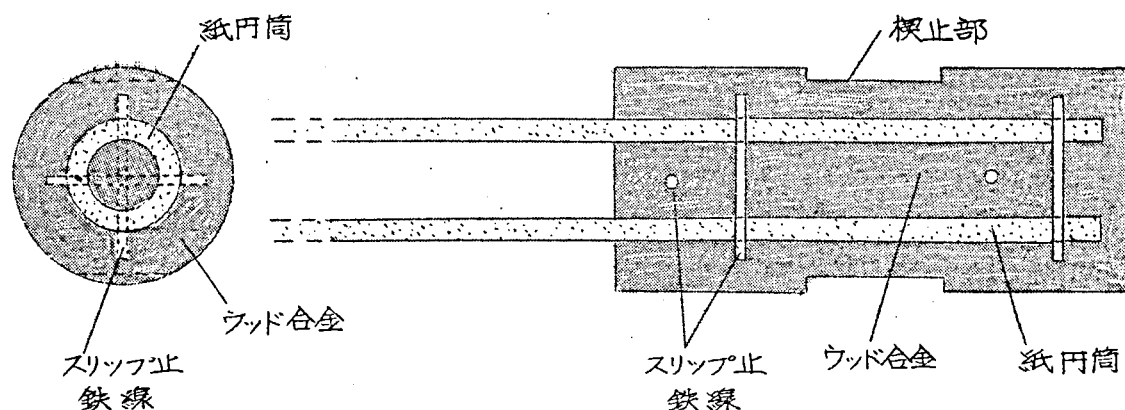
サンプルは圧縮試験の時と同様中心部にスパイラルを入れてその上に捻線、紙巻きを行つた後、スパイラルから導体部分を抜いて行くことにより製作した。サンプルの両端末は、オ 60 図に示す如く予めボーリングで約 10 ケの孔(径 4 mm)をあけウッド合金で鑄込んだ。

円筒内外のウッド合金は孔を通じて連絡せしめ、捩り試験の際、端末

部における試験機の掴みとサンプルの間、および層間のスリップすることを防止した。

特に振りモーメントの大きくなるものは孔の部分に銅線を通した後ウッド合金で鑄込んだ。

図60 試験ケーブル掴部断面



筆者の調合したウッド合金組成は

Bi	50.1 %
Cd	10.0 %
Pb	26.6 %
Sn	13.3 %

であり、融点は 68℃で、鑄込みの際紙を変質させる恐れはない。

実験に際しては 3.6 度/秒-のスピード（当試験機の最低スピード）でモーターにより振り、挫屈状況を観察するとともに振りモーメントー振り角度曲線を自記せしめたが一部のものは手動で行った。

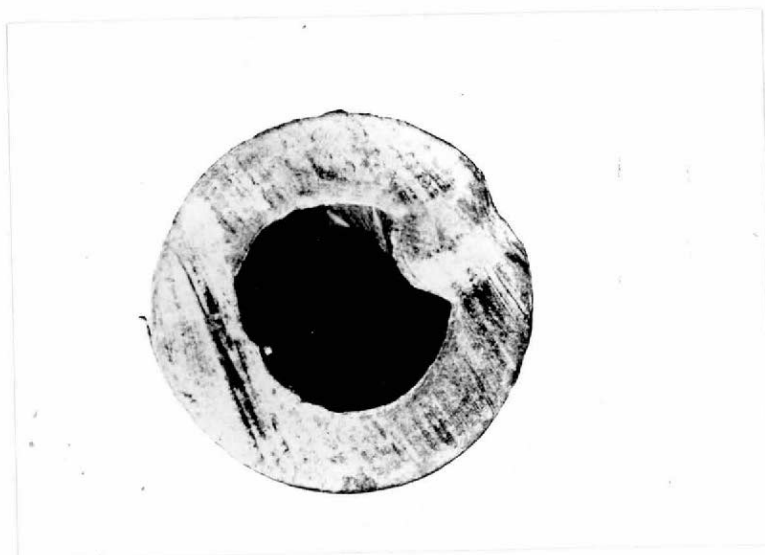
生紙を振った場合は図61の如く円筒壁面に一定のピッチ（円筒形状により一定）の内方挫屈が螺旋形に発生する。この挫屈の発生した円筒の断面は図62の如くで、円周方向の挫屈波数  $n$  は 2 であり、更に振振りを加えても 2 より大きくならない。この螺旋状の  $n=2$  なる壁面

の内方挫屈は、現在迄に捩り挫屈研究の対象となった円筒殻では珍しいもののようである。

オ61図 生紙空円筒の捩り挫屈



オ62図 捩り挫屈を生じた生紙円筒の断面



捩り試験における捩りモーメント—捩り角曲線の例をオ63図に示すが、曲線の突然変動する点において挫屈が始まる。生紙の場合の限界点は曲線が飽和しかかった点にある。なお、この自動記録した曲線の例を油浸円筒のものと対比して、つぎの節のオ70図に掲げた。

オ64図はこれをさらに捩り応力—剪断歪曲線に書き換えたものであり、挫屈を起す迄の曲線はいずれの場合も大体一致しており、直線部か

の傾斜から算出した相当剪断弾性係数は約  $17000 \text{ Kg/cm}^2$  であった。

なお、オ/〇表に実験のデータを、オ65図、オ66図には挫屈剪断歪— $(\epsilon/t)^{\frac{3}{2}}$  特性および挫屈応力— $(\epsilon/t)^{\frac{3}{2}}$  特性を示した。この場合の歪は円筒壁中心部の歪を採用した。

この場合も曲げの時と同じく積層円筒ではあるが、この理論的解析は困難であるので前節の異方性円筒の理論式にならい、かつ等方性円筒の捩りと比較しやすい様に  $(\epsilon/t)^{\frac{3}{2}}$  で整理した。

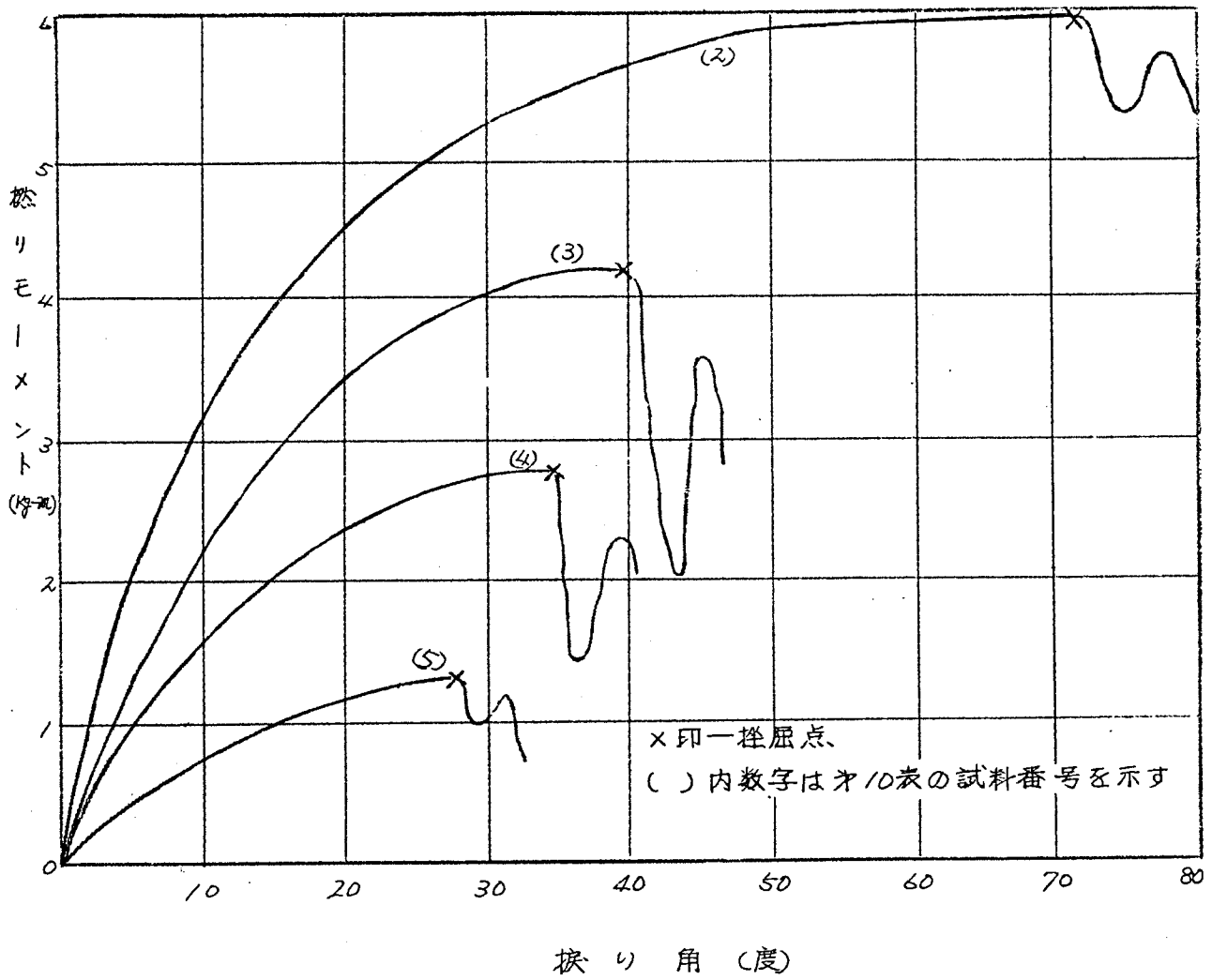
オ65図に依れば生紙円筒の挫屈歪は鉛管等に比して遙かに少い。測定値に相当バラツキはあるが生紙円筒の圧縮挫屈と同様な傾向にあり、挫屈歪は  $(\epsilon/t)^{\frac{3}{2}}$  に比例して増加する。

また、捩りスピード3.6度/秒の時と手動の時とでは有意差はない。従つて曲げの場合と同じくわれわれの扱う程度の範囲では捩りスピードにより挫屈歪は変らない。オ/〇表、試料番号 15—18は試料長を変えて

実験を行つたものであるが、これもバラツキは多いが曲げの時と同様この範囲においては  
試料長さによる差違はないと考えてよい。

※ 6 3 図

換りモーメント — 換り曲線 (生紙円筒)



オ 6 4 図

擦り剪断応力 ～ 剪断歪曲線 (生紙円筒)

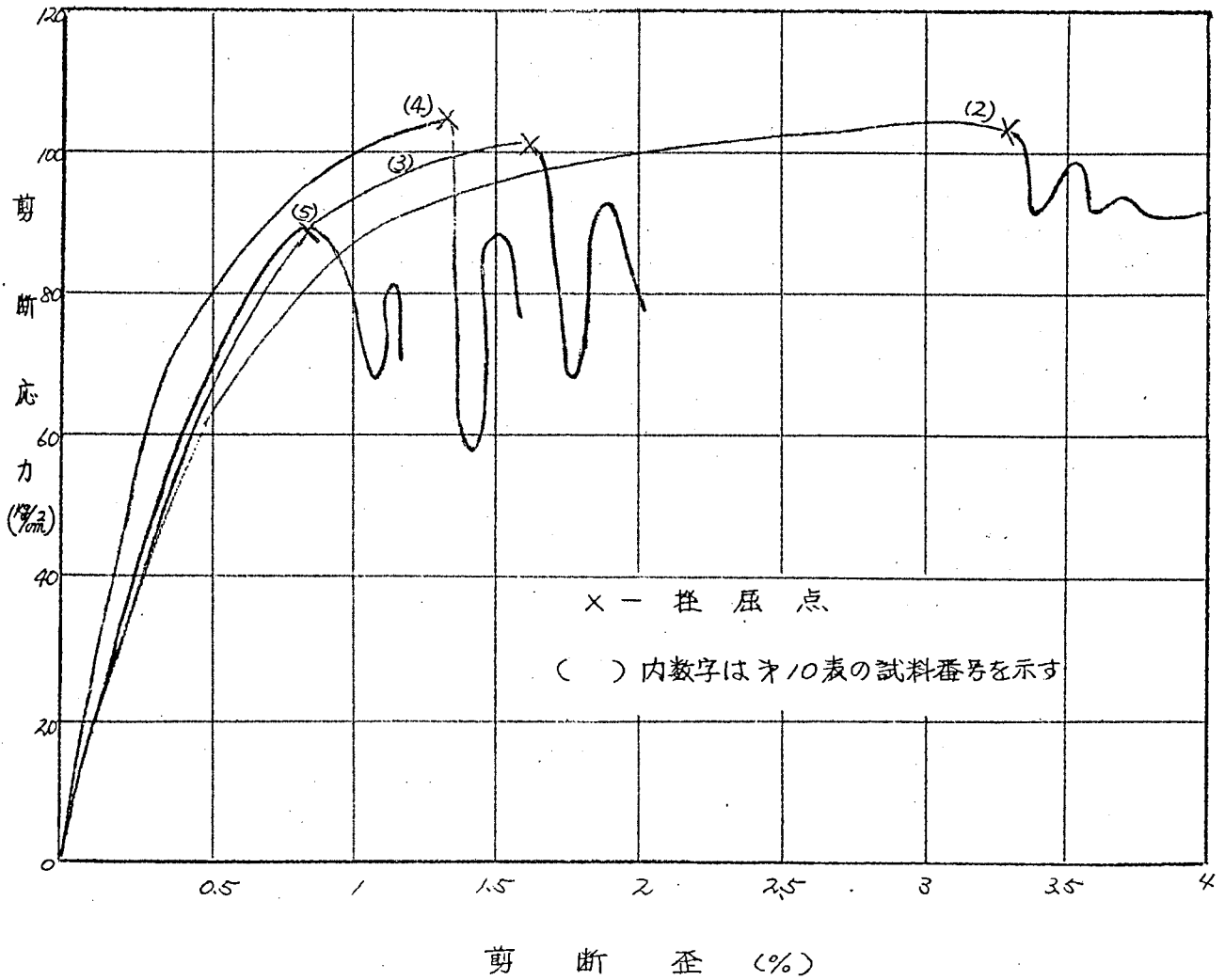




表 10 生紙円筒の折り試験

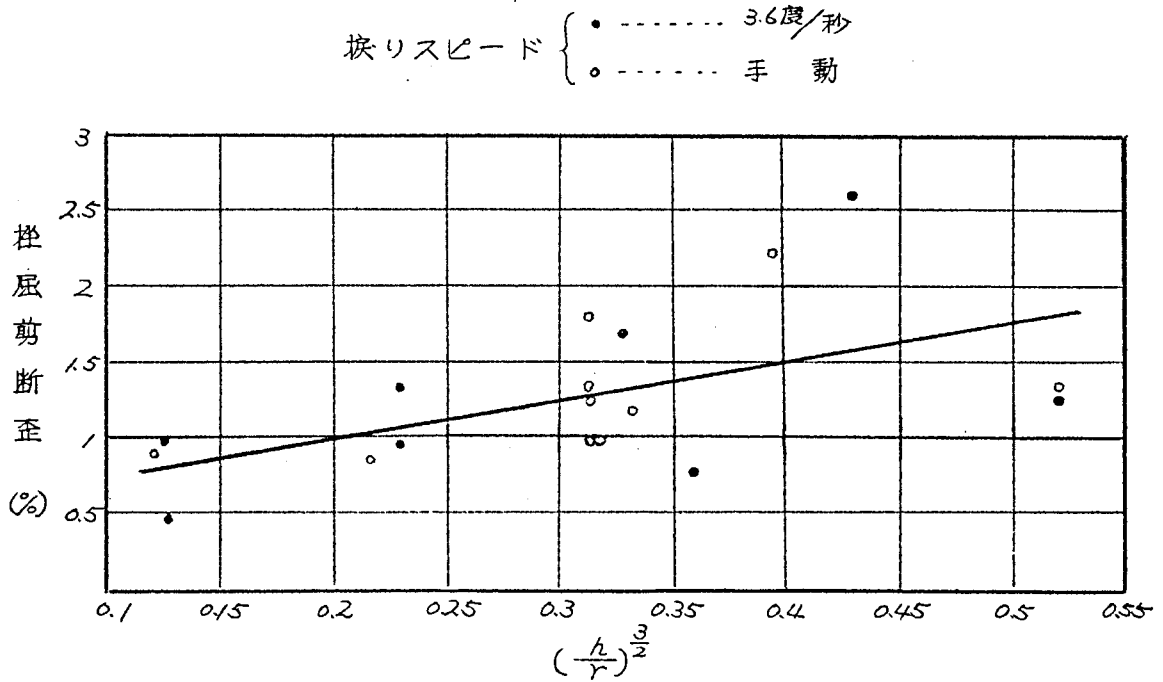
折りスピード 3.6度/秒

試料番号	試料長 (cm)	外径 (cm)	内径 (cm)	中心半径 r (cm)	紙厚 h (cm)	$(\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$	挫屈時折りモーメント (kg-m)	挫屈時折り角度 (度)	挫屈剪断応力 $\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )	挫屈剪断歪 (%)
1	48.5	3.52	1.8	1.33	0.86	0.519	10.65	26	137.2	1.24
2	51.0	3.22	"	1.25	0.71	0.428	6.0	60	104.3	2.57
3	49.7	2.92	"	1.18	0.56	0.326	4.2	40	102.9	1.66
4	50.4	2.62	"	1.105	0.41	0.227	2.8	34	106.5	1.3
5	51.5	2.32	"	1.03	0.26	0.128	1.3	27	88.2	0.935
6	48.7	3.52	2.1	1.405	0.71	0.358	6.2	15	85.3	0.75
7	50.5	"	2.4	1.48	0.56	0.232	5.3	18	81.4	0.92
8	51.5	"	2.7	1.55	0.41	0.135	3.3	9	61.2	0.47

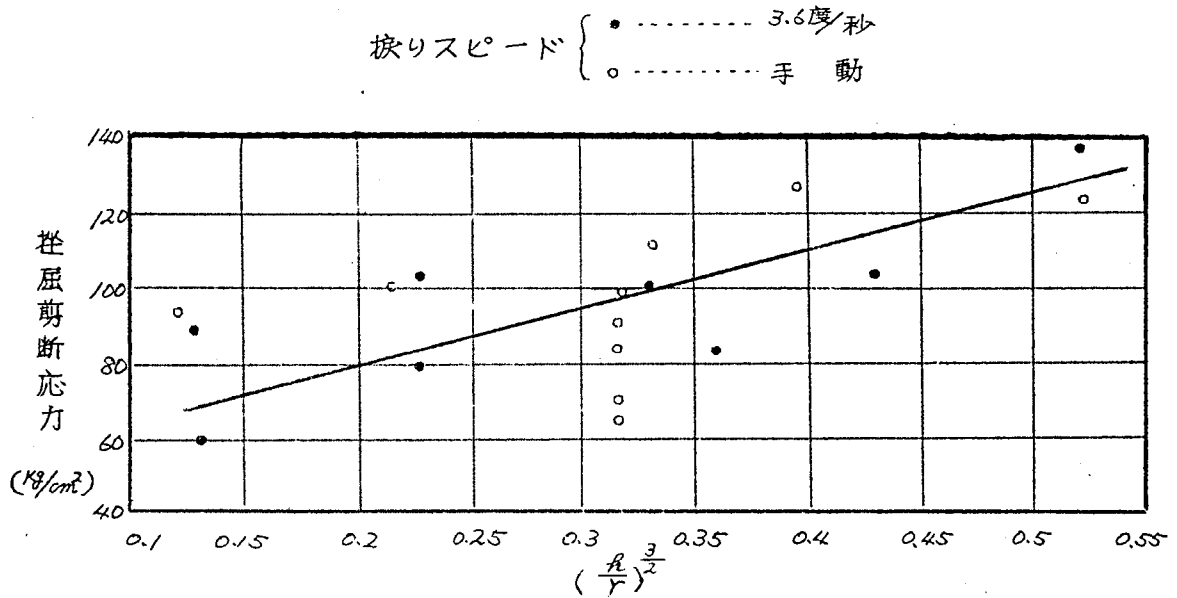
(手動によるもの)

9	50.3	3.52	1.8	1.33	0.86	0.519	9.6	28	123.5	1.29
10	49.5	3.2	"	1.3	0.7	0.394	7.5	48	128	2.2
11	50.0	2.9	"	1.17	0.55	0.332	4.6	27.5	112.5	1.13
12	49.5	2.8	"	1.15	0.5	0.312	3.2	32	90.5	1.29
13	50.0	2.6	"	1.1	0.4	0.218	2.7	24.5	102.5	0.845
14	50.0	2.3	"	1.02	0.25	0.121	1.35	24	91.5	0.855
15	34.5	2.8	"	1.15	0.5	0.312	2.35	14	66.6	1.2
16	28.5	"	"	"	"	"	3.00	16.7	85.0	0.97
17	24.5	"	"	"	"	"	3.5	28	99.3	1.76
18	19	"	"	"	"	"	2.3	10	70.9	0.95

オ 65 図 捩り挫屈剪断歪  $\sim (\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$  特性 (生紙円筒)



オ 66 図 捩り挫屈剪断応力  $\sim (\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$  特性 (生紙円筒)



また、波山の稜線と軸とのなす角度  $\theta$  は、今迄の各種円筒の実験結果では相当に小さいことが報告されている。(36)(37)

たとえば、L.H. Donnel 氏の等方性円筒の実験では

$l = d$  の時  $\theta \approx 15^\circ$

$l = 3d$  ,  $\theta \approx 10^\circ$

$l = 6d$  ,  $\theta \approx 9^\circ$

ここに  $l$  : 筒 長

$d$  : 外 径

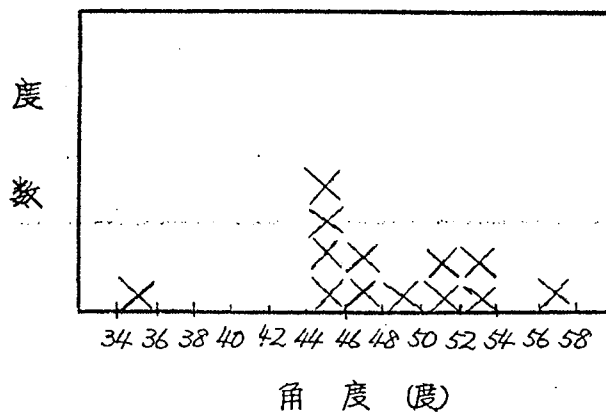
井上氏の合板円筒における実験では (37) (樺、2mm厚、板目平行組合)

$l = d$  の時  $\theta \approx 15^\circ$

われわれの実験では  $\theta$  はこれらより大きく、オ67図の如く  $45^\circ$  近くの値を示した。

オ67図 挫屈波と軸との角度

生紙円筒



なお、使用した紙は

紙	厚	0.125 mm	
密	度	0.89 ~ 0.9	
紙捲時張力		約 4~5 kg	
紙	巾	19 mm	
ピ	ツ	チ	19.7 mm
紙の含湿度		約 4 %	

である。

### 3.3.3 油浸紙円筒の捩り試験

試料はソリッドケーブルと同様な乾燥浸潤を経たものを用いた。

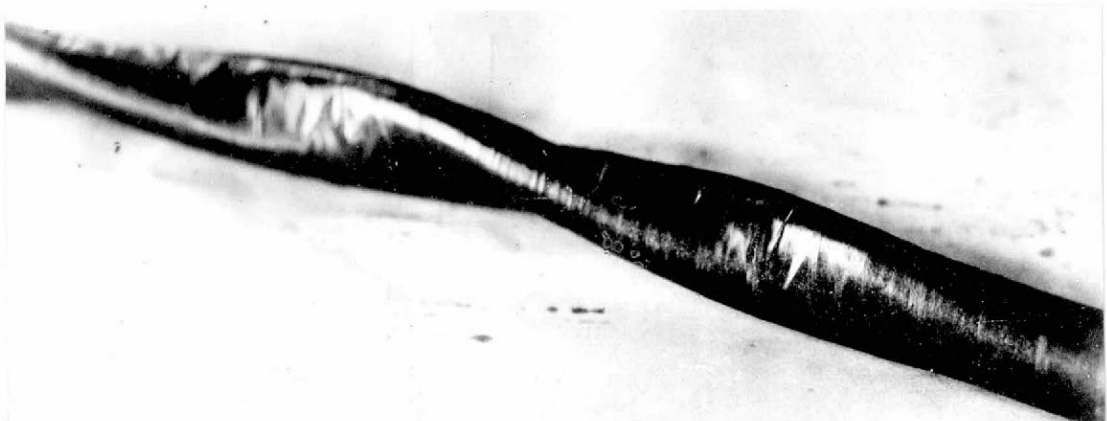
OF油で浸潤しなかつた理由は、OFケーブルではSLケーブルの如く浸潤後燃合することなく、ソリッドケーブル用コンパシンドで浸潤した方が応用範囲が広いと考えたからである。

サンプルの作成は生紙円筒と同様な方法で行ったが、油浸紙の場合はスパイラルを入れなくても心線を抜き得るものもあつた。

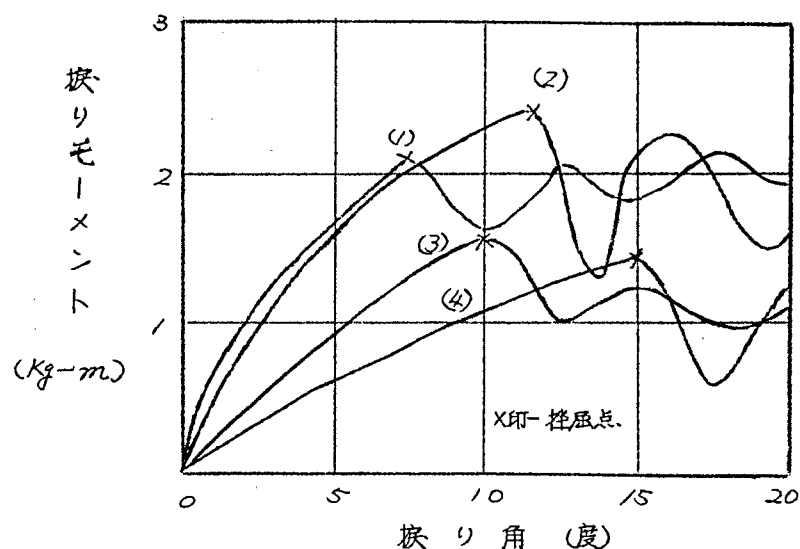
油浸紙円筒を捩つた場合はオ68図の如く植円断面 ( $n=2$ ) で捩り屈服する。この屈服の状況は油浸紙の圧縮試験の時と同じく大きく弯曲し、少い歪では屈服後でも元に戻つてしまう。完全にもどる迄に数分を要するものもあつた。オ68図は屈服後さらに捩りを続け変形状態に固定させたものである。

捩りモーメント捩り曲線の例をオ69図に示す。油浸紙の場合屈服点は曲線の直線部分から始まり、生紙と様相を異にしている。

オ68図 油浸紙空円筒の捩り屈服



オ69図 捩りモーメント～捩り角曲線（油浸紙円筒）



註- ( ) 内数字はオ//表の試料番号を示す。

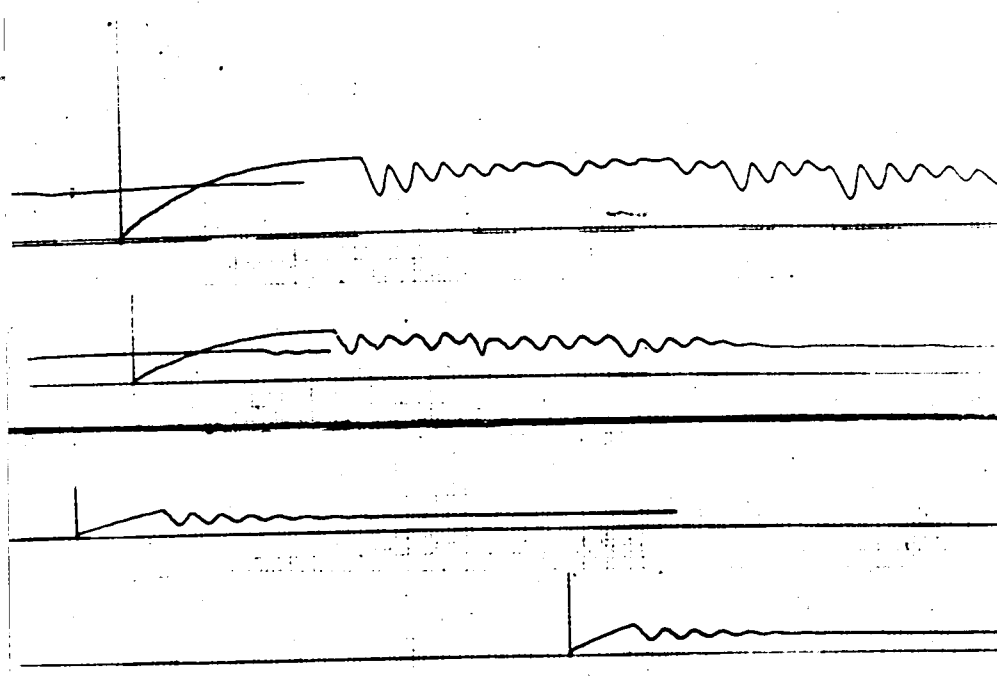
オ70図は生紙および油浸紙円筒の捩り試験において自動記録用紙に描かした捩り角-捩りモーメント曲線の例を比較して掲げたものである。上の二つは生紙、下の二つは油浸紙で両者にそれぞれはつきりした特徴がある。

オ70図 捩り試験における捩りモーメント-捩り角度曲線の例

{ 縦 軸 - 捩りモーメント  
横 軸 - 捩り角度

生紙

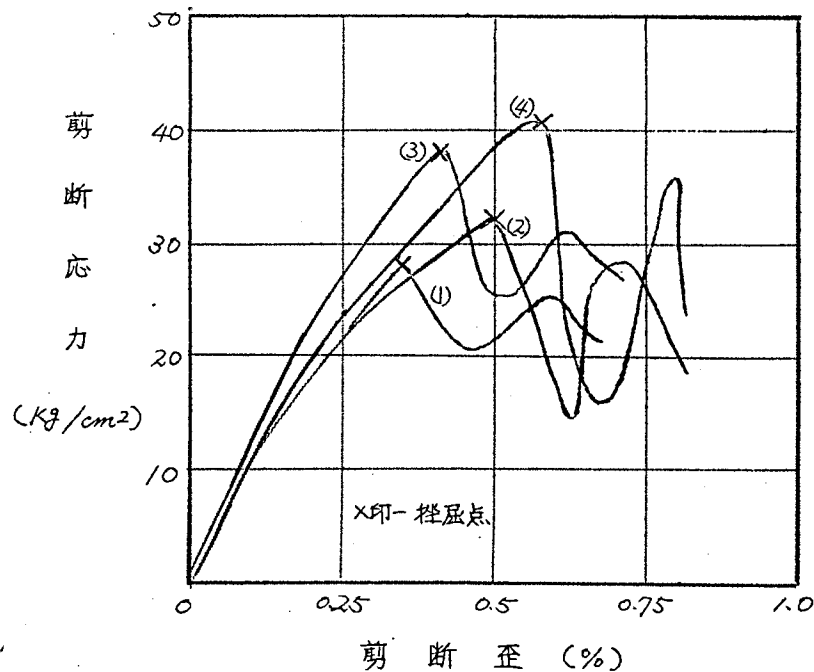
油浸紙



油浸紙の場合曲線における挫屈点の位置は判然としているが、外觀上の挫屈開始の判別は生紙に比し幾分困難である。

オ71図は *stress-strain curve* に書き換えたものであるが、油浸紙においても各サイズ円筒とも挫屈迄の *curve* は大体一致する。直線部分の傾斜から算出した相当剪断弾性係数は約  $12000 \text{ kg/cm}^2$  であつた。

オ71図 換り剪断応力～剪断歪曲線(油浸紙円筒)



註-( )内数字はオ11表の試料番号を示す。

実験の詳細はオ11表に一覧する。オ69およびオ71図の図中の数字はこの表の試料番号に相当する。この場合の歪も円筒壁中心部の歪をとつた。

オ72図、オ73図に挫屈剪断歪～ $(h/r)^{3/2}$ 特性および挫屈応力～ $(h/r)^{3/2}$ 特性を示す。

オ 11 表 油浸円筒の換り

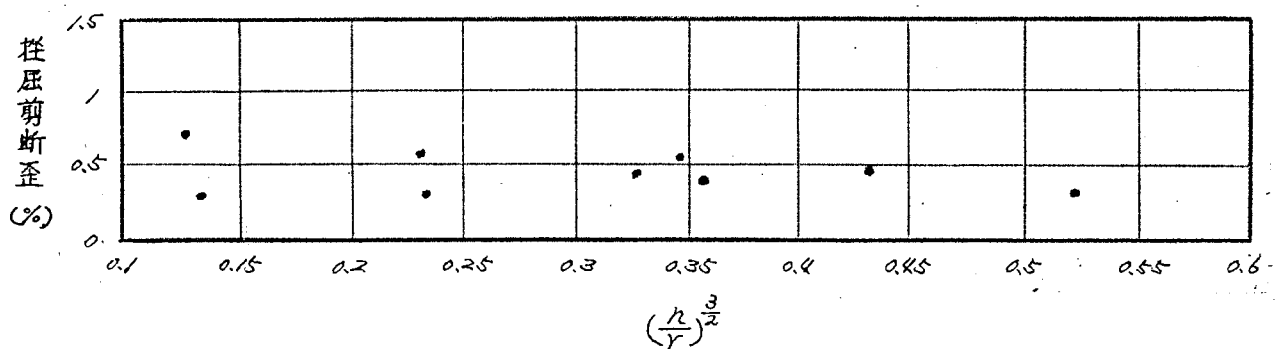
換りスピード  $3.6^\circ/\text{sec}$

試料番号	試料長 (cm)	外 径 (cm)	内 径 (cm)	中心半 径 (cm)	紙 厚 $h$ (cm)	$(\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$	挫屈時 換りモ ーメント (Kg-m)	挫屈時 換り角 度 (度)	挫屈剪断 応 力 (Kg/cm <sup>2</sup> )	挫屈剪 断 歪 (%)
1	50.0	3.52	1.8	1.33	0.86	0.519	2.1	7	27.1	0.325
2	49.5	3.22	"	1.25	0.71	0.428	2.5	11	43.5	0.48
3	"	2.92	"	1.18	0.56	0.326	1.6	"	39.2	0.45
4	50.5	2.62	"	1.105	0.41	0.227	1.5	14.5	57	0.55
5	49.5	2.32	"	1.03	0.26	0.128	1.2	18	81.3	0.65
6	"	2.68	1.61	1.07	0.53	0.348	2.0	15	61	0.566
7	50.3	3.52	2.1	1.405	0.71	0.358	"	9	27.5	0.439
8	50.5	"	2.4	1.48	0.56	0.232	1.4	5	21.5	0.255
9	50.0	"	2.7	1.55	0.41	0.135	1.0	6	18.5	0.272

挫屈剪断歪は生紙の場合よりさらに低く、油浸円筒の圧縮試験と同傾向を示し、 $(\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$ が増加しても挫屈歪はあまり変らない。この理由は前章 2.3.3 の曲げの場合と同じく乾燥浸潤工程により紙層間に隙間が多くなり、積層条件が低下するためであると考ええる。

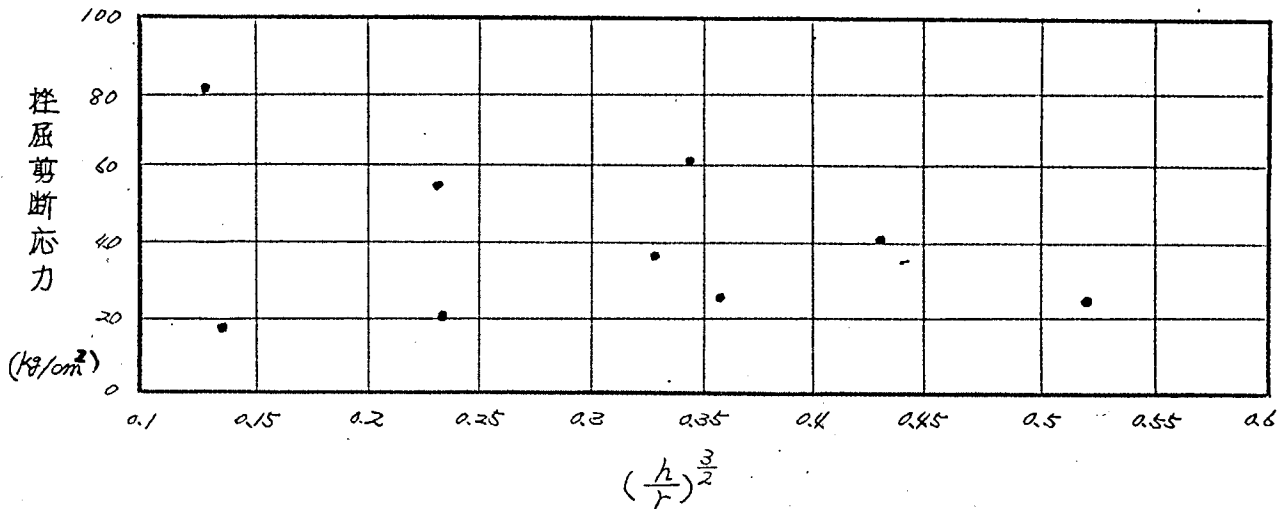
オ 72 図 挫屈剪断歪  $\sim (\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$  特性 (油浸紙円筒)

換りスピード  $\dots\dots 3.6^\circ/\text{秒}$



オ73図 挫屈剪断応力  $\sim (\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$  特性 (油浸紙円筒)

振りスピード 3.6度/秒



### 3.3.4. 内部心線を有する場合の絶縁層円筒の振り

#### 3.3.4. / 内部心線をもつ生紙円筒の振り

生紙空円筒の振り挫屈は壁面に  $n=2$  なる内方挫屈が一定のピッチの螺旋を画いて生じた。しかし内部に燃線心のある時は内方変位が制限されるので外方に挫屈する。

オ74図は同一サイズの生紙円筒の心線のあるときとない時との挫屈状況を示したものであるが、いずれの場合も挫屈波のピッチは一定である。下図は空管、上図は心線のある場合である。

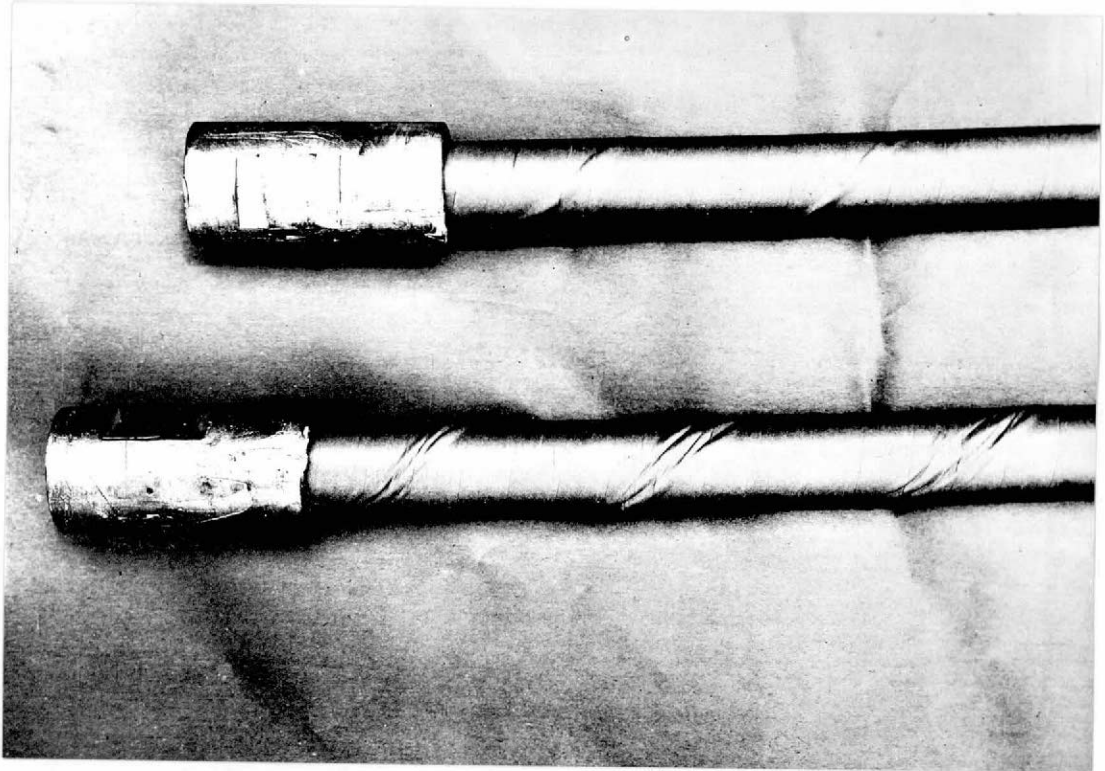
燃線心のある場合も空管のときと同じく、さらに振りを加えても波数は2より増加しない。

この外方変位挫屈は内部迄及んでおり、たとえば、外径 43.8 mm、燃線外径、25.4 mm、紙数 80 枚以上に及ぶ太物でも、オ75図に示す如く燃線上の紙迄挫屈皺を生じている。この点曲げによる挫屈皺と同じである。

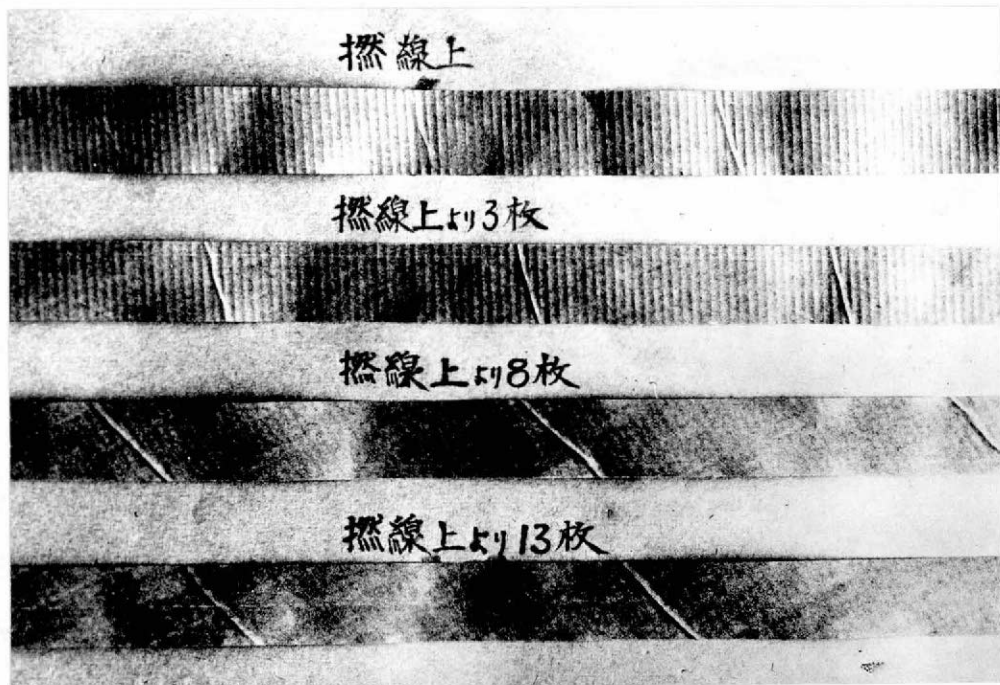


オ74図 生紙円筒の捲り挫屈

{ 上 段 — 内部燃線を有するもの  
 { 下 段 — 空 円 筒



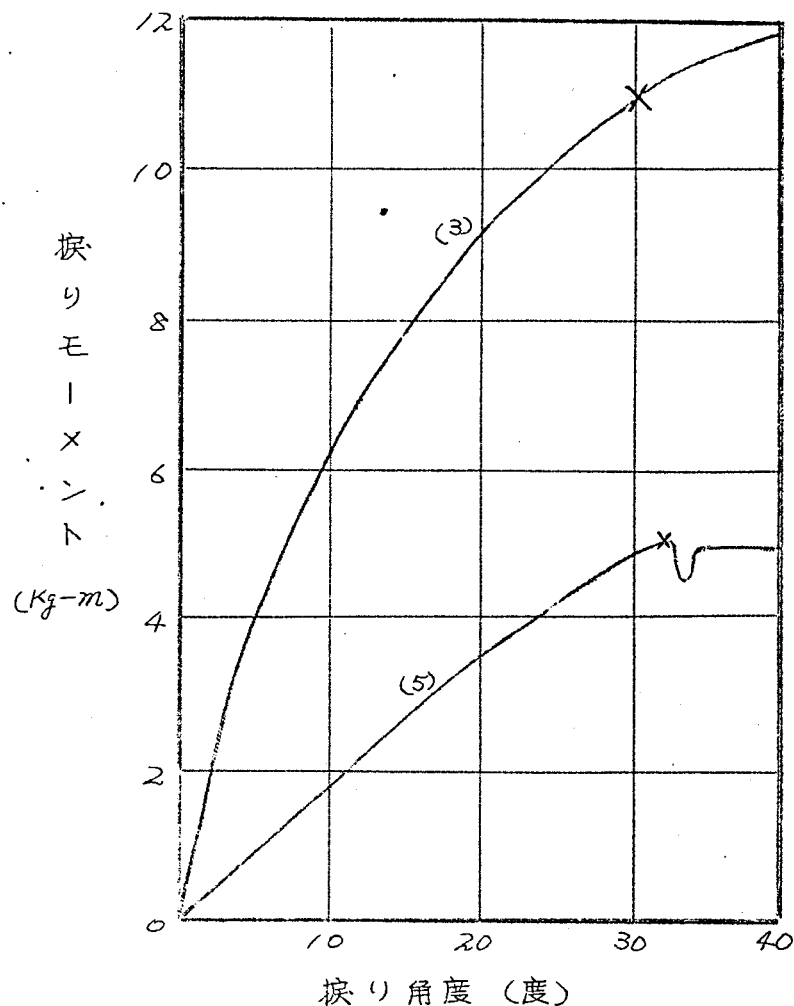
オ75図 捲り挫屈の内部迄及ぶ状況



オ76図に捩り試験時の捩りモーメント—捩り角曲線の例を示す。  
 X印の点が捩屈点であるが曲線の上ではこの点は判然とするものと、  
 しないものがあつた。オ76図は両者の例を示す。しかし外観上捩屈  
 開始の判別は極めて分りやすい。

オ77図には捩屈剪断歪— $(\frac{1}{2}\pi)^{\frac{3}{2}}$ 特性を示す。またその詳細はオ  
 78表に示す。心線のある場合はバラツキも少いが心線のない時の測  
 定値のバラツキは大きく、両者の捩屈剪断歪の間には有意差は認められ  
 ない。

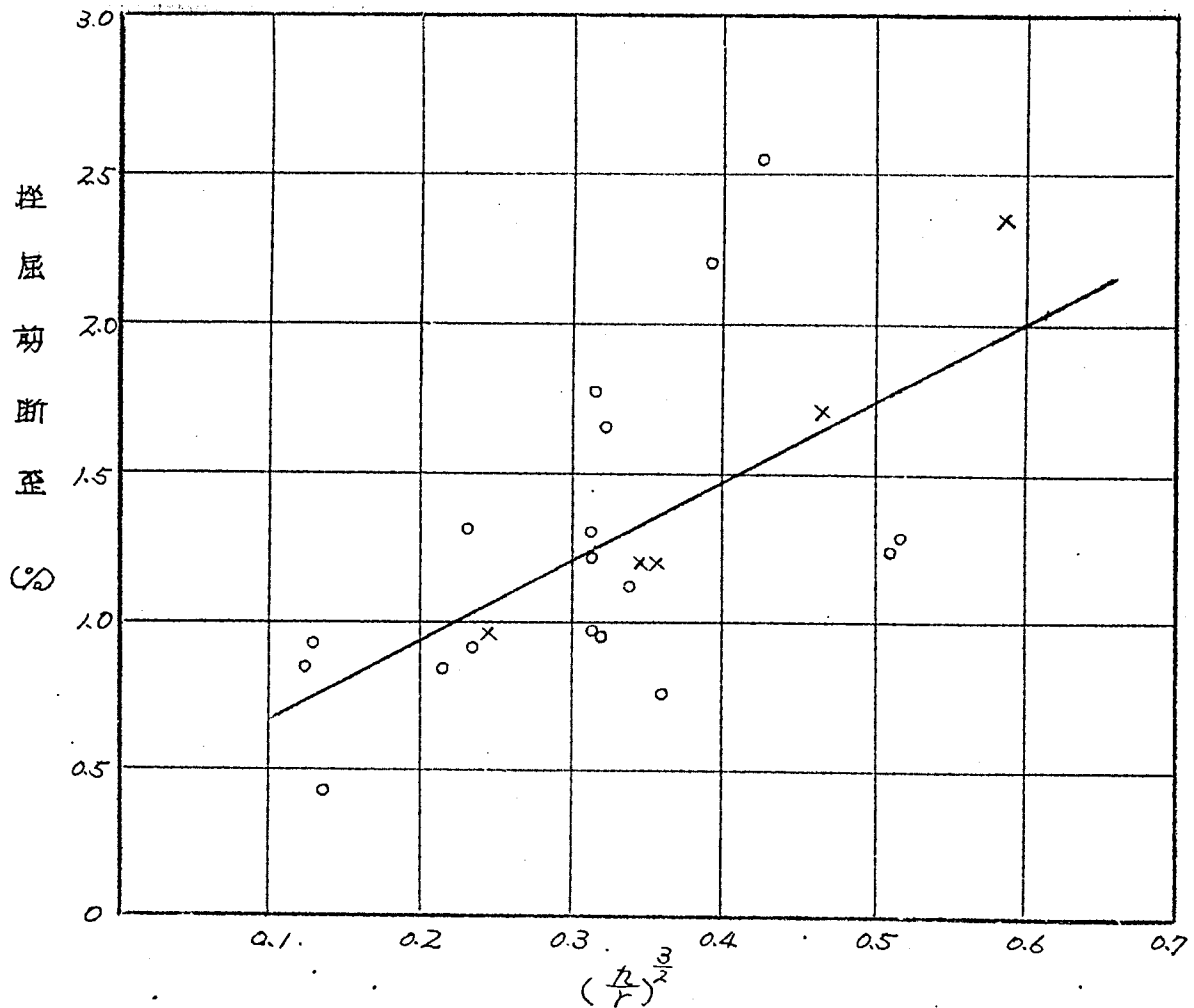
オ76図 捩りモーメント—捩り角度曲線の例 (生紙ケーブル)




註—( )内数字はオ78表の試料番号を示す。

オ 7 7 図 挫屈剪断歪  $\sim (\frac{L}{r})^{\frac{3}{2}}$  特性 (生紙)

(○ ---- 紙円筒のみ  
× ---- 紙円筒内部撚線あり)



### 3.3.4.2 内部心線をもつ油浸紙円筒の捩り

さきに油浸空円筒を捩つた際は楕円断面 ( $n=2$ ) で捩り屈服したが、心線のある場合は挫屈形式が全く一変し螺旋状挫屈波を生ずる。この挫屈波は外部では生紙のそれに近い外方変位であるが (オ 7 8 図参照) 内部は生紙と異なり捩りにより弛められる方向の紙層のみ螺旋形に  状の皺を生じ、締められる方向の紙層には全然異状は認められない。

ただし、この場合最初に生ずる挫屈波が最も優勢ではあるが、振りを加えとともに最初の螺旋状挫屈波の間に何本かの螺旋状挫屈が増加する。すなわちそれはより増加する。この時の挫屈波稜線と軸のなす角度は生紙の場合に比して少い。(すなわち、ピッチが長くなる)。オク図は振り試験時自記せしめた振りモーメント振り角曲線の例である。X印が挫屈限界点であるが生紙と異なり曲線の上でもこの点のはつきりしている。また、外観上の挫屈判別も容易であつた。オク図は挫屈剪断歪  $-(\frac{1}{2}\pi)^{\frac{3}{2}}$  特性を示す。これによれば油浸紙円筒では測定値のバラツキは大きい、心線のあるときは、ない時に比して約3倍に向上する。この特性により海底線接続時の燃合せピッチ変換作業等における許容振り量の基準を定めることができる。

オク図 油浸紙円筒の振り挫屈(内部燃線あり)

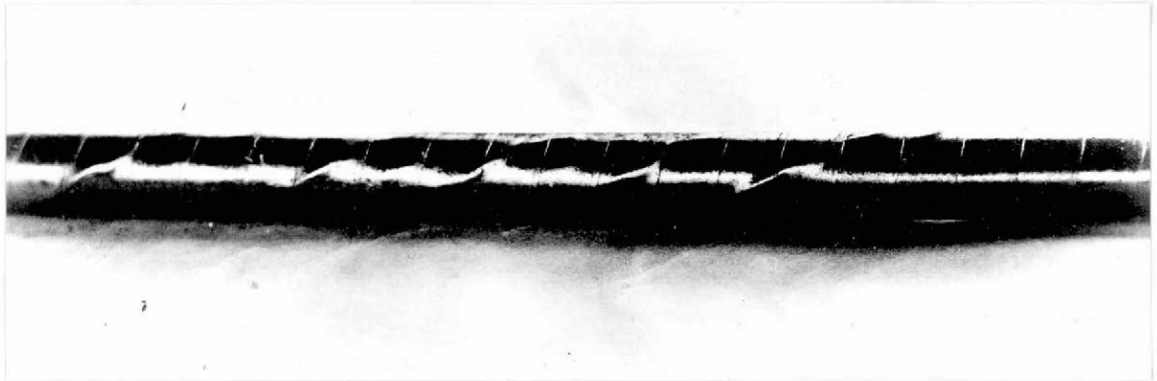
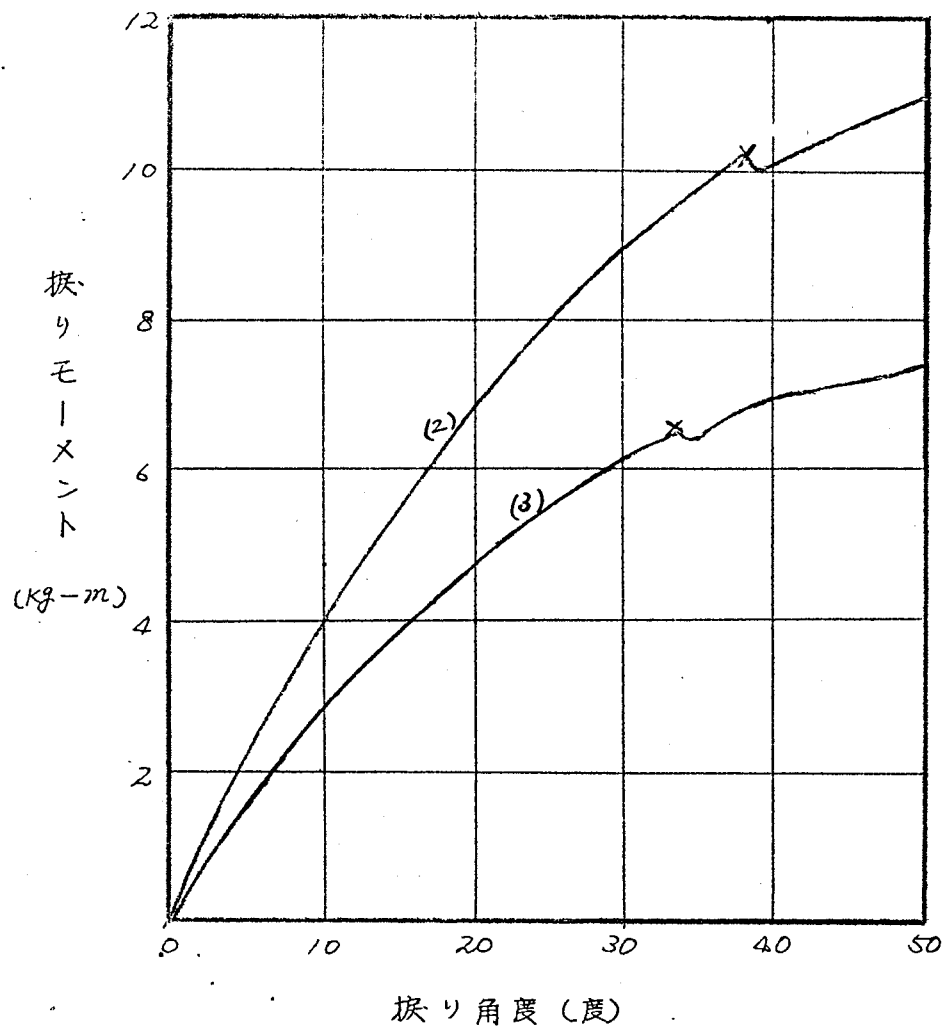


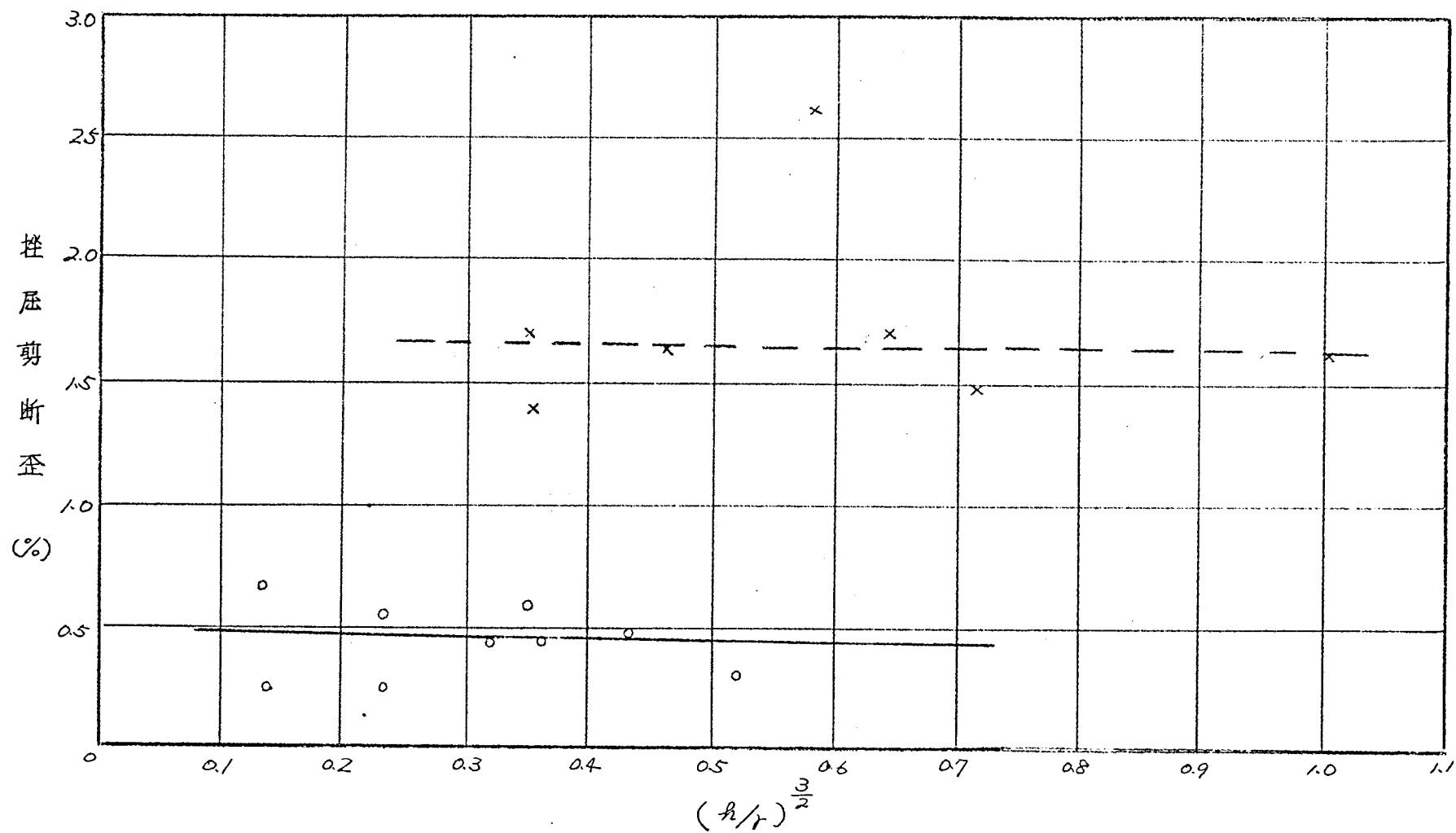
図79 ねりモーメント～ねり角度曲線の例（油浸鉄ケーブル）



註- ( )内数字はオ/ス表の試料番号を示す。

図80 変形歪～ $(\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$ 特性 (油浸紙)

(○) 紙円筒のみ  
(×) 紙円筒内部に鉄線あり



なお、生紙、油浸紙両者の実験の詳細はオノス表に示す通りである。

上記の如く生紙円筒の場合は内部心により挫屈限界は向上しないが油浸の場合は顕著に向上した。両者とも軸方向圧縮挫屈の場合と全く対応することは非常に興味がある。また、空円筒の時の挫屈状況、等方性円筒における挫屈形態をも考え合わせれば、そこにはパイプ形状材質と挫屈形式に関して一連の相似則が存在するように思われる。

曲げの場合、内部心のある時は油浸紙円筒の挫屈歪は生紙より高く、実際にも油浸後のケーブルで挫屈の生じにくいことを前章に述べた。しかし、捩りの場合はオク7図、オ80図を比較して明らかな如く、 $\frac{r}{t}$ の円筒の小さい部分では油浸紙の~~歪が~~挫屈歪が大きく、 $\frac{r}{t}$ の大きいものは生紙の方が大となる。

また、前述の油浸後の捩り挫屈<sup>け</sup>は部分的に集中しやすく、これが一旦生じた場合は、曲<sup>け</sup>挫屈<sup>け</sup>離以上に電気的弱点となる。

表 1/2 内部熱線を有する場合の絶縁紙円筒の捩り

生 紙

試料番号	試料長 (cm)	外 径 (cm)	内 径 (cm)	中心半径 r (cm)	紙 厚 h (cm)	$(\frac{h}{r})^{\frac{3}{2}}$	捩屈捩りモーメント (kg-m)	捩屈捩り角度 (度)	捩屈剪断歪 (%)
1	49.0	3.73	1.8	1.38	0.965	0.58	17.0	48	2.35
2	49.5	3.33	"	1.28	0.76	0.457	15.0	38	1.71
3	50.0	3.0	"	1.2	0.6	0.353	10.7	30	1.25
4	49.5	2.68	"	1.12	0.44	0.24	7.3	25	0.99
5	50.0	2.68	1.61	1.07	0.53	0.348	5.0	32	1.19

油 浸 紙

1	50.5	3.73	1.8	1.38	0.965	0.58	13	55	2.62
2	51.3	"	"	1.28	0.76	0.457	12	38	1.65
3	49.0	3.01	"	1.2	0.6	0.353	6.5	33	1.41
4	50.4	2.68	1.61	1.07	0.535	"	5.1	45	1.67
5	50.5	2.18	1.0	0.79	0.59	0.645	3.5	60	1.64
6	50.0	1.85	0.6	0.61	0.62	1.014	1.5	75	1.6
7	50.2	1.4	"	0.5	0.4	0.715	0.9	85	1.48



### 3.3.5 内部心線および外部被覆のある場合の絶縁層円筒の捩りについて

生紙円筒は被覆を施されて后、捻合されることはないが、油浸円筒の捻合せは、SLケーブルの如く必ず被覆后に行われる。実験として、下記のSLケーブルにつき捩り試験を行った。


ケーブル捻合せは必ず右捻り であるので捩方向は右捩りとした。(国内電線界ではS捻りを右捻りと呼んでいる。以下これにしたがう。)

オ/3表 供試ケーブル構造表

試料番号	No.1	No.2
捻線断面積 ( $mm^2$ )	150	80
油浸紙外至 ( $mm$ )	26.8	21.8
被鉛外至 ( $mm$ )	3 /	26

(試料長 50 cm)

捩り試験における捩りモーメント—捩り角度特性をそれぞれオ/8/図およびオ/8/2図に示す。×印は捩屈点で鉛被のある場合はこの判別は不明瞭で正確ではない。しかし鉛被による内部絶縁層の捩屈歪の向上は少いと判断した。

被鉛のある場合は鉛被上にはラセン状の捩屈変形は認められず、極端に捩りを加えると部分的に破壊する。これは今迄に述べて来た如く鉛被の捩屈歪は曲げの時と異なり内部コアのそれより高く、内部が先に捩屈するためである。また、内部の油浸層では螺旋形の外方変位は外部鉛被に押えられて生じないが、前節に述べた心線のある油浸円筒の捩屈時における内層の変形と同じく、状に折りた、まれた特異な皺が螺旋形に生じる。この状況をオ/8/3図に示す。

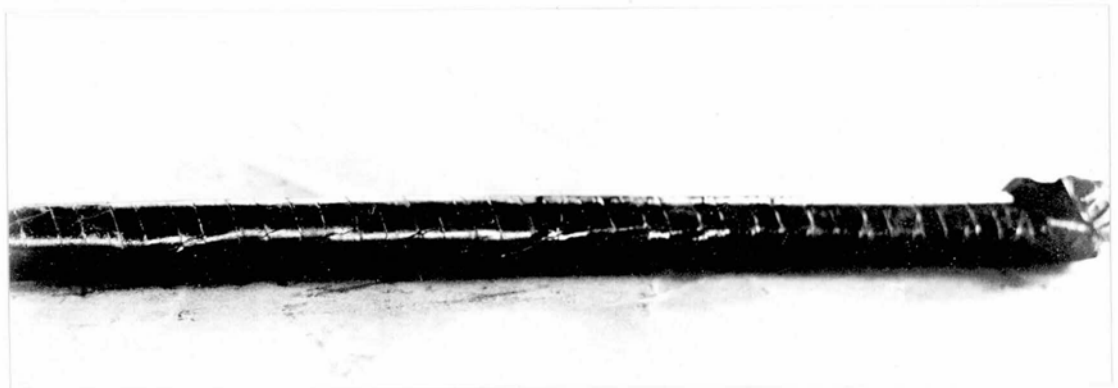
なお、この紙の折畳み皺は捩り方向(この場合は右捲)の紙層には全

く異状は認められず、弛められる方向の紙層のみに発生し、ところどころこの皺に沿って紙切れを生じた。

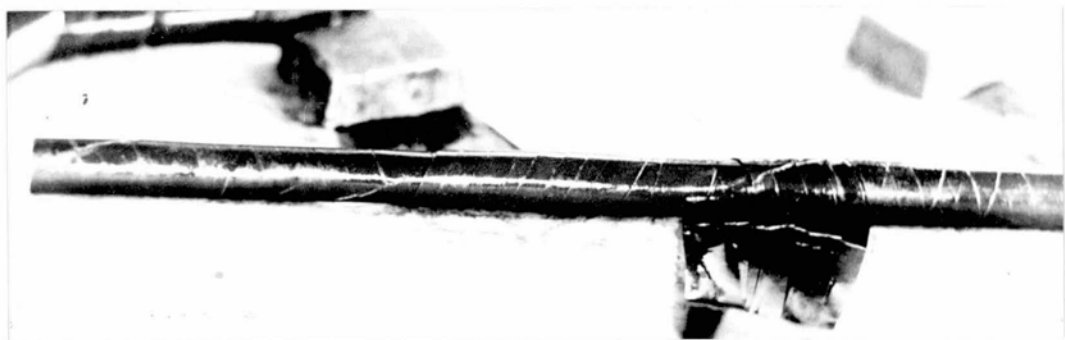
オ84図にこの状況を示すが、左捲の層のみに挫屈皺の発生している様子がよく分る。

このような現象は事故を生じた海底線でも今迄も注目されていたが、これが捩り挫屈に基づくものであることが上記により推定される。

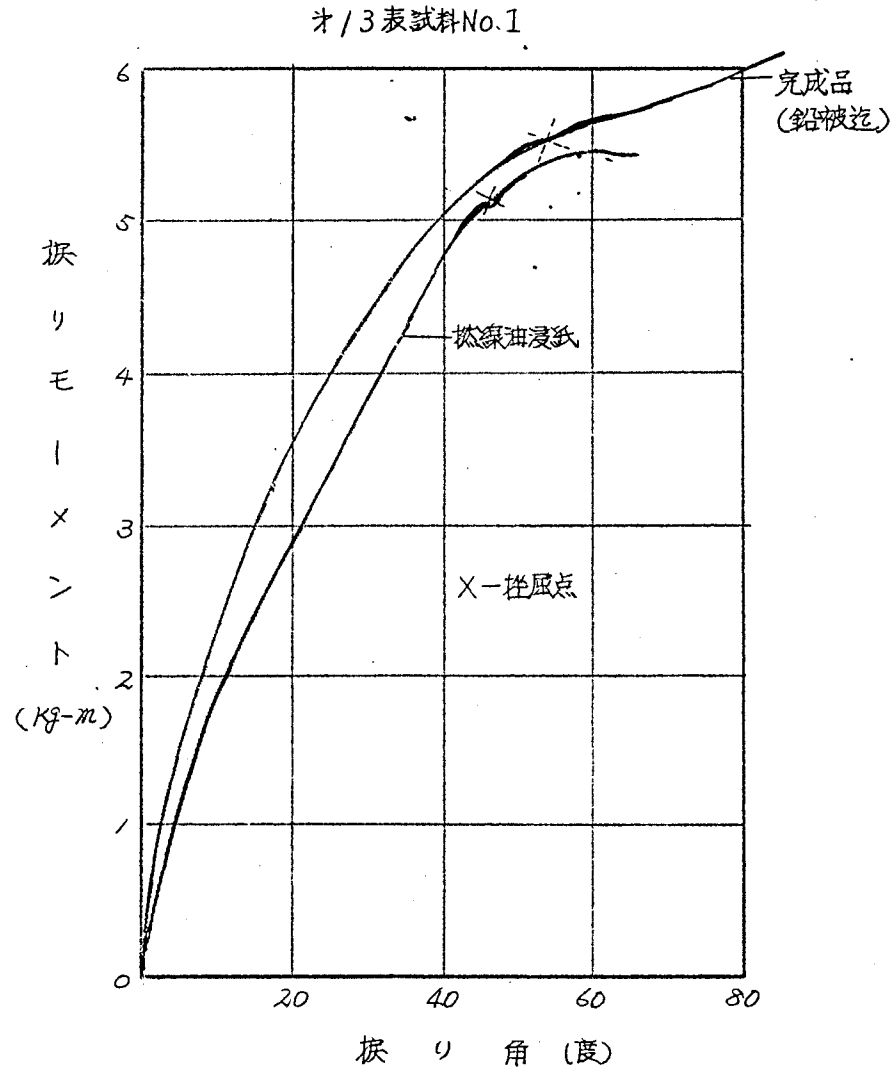
オ83図 撚線、鉛被を有する場合の油浸円筒の  
挫屈状況（表面）



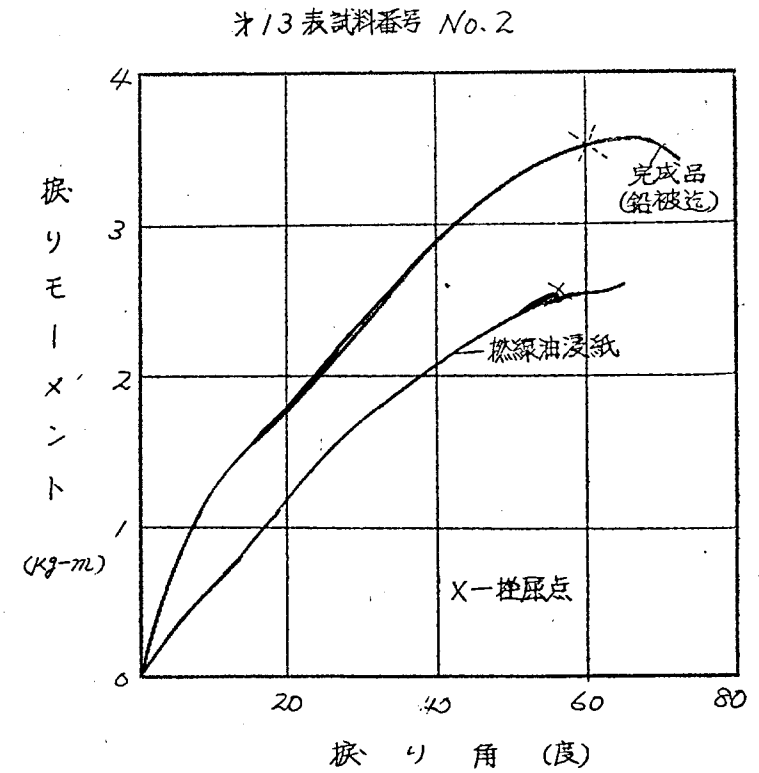
オ84図 撚線、鉛被を有する場合の油浸円筒の  
挫屈状況（内部）



オ81図 燃線、鉛被を有する場合の油浸円筒の振り試験(その1)



オ82図 燃線、鉛被を有する場合の油浸円筒の振り試験(その2)



たとえば佐世保附近に布設した東邦電力向 33 KV  $3 \times 100 \text{ mm}^2$  SL 型二重鉄線鎧装海底ケーブルが昭和 10 年 11 月に起した絶縁破壊事故は、各心とも故障点を通り 50 ～ 100m の間にわたりオ 83 図に示す如き特異な皺を生じ、これが破壊の原因である旨先方へも報告されている。左巻の紙のみにこれを生じたことから当時は、なんらかの原因で左捩りが加わったものとして、締め方向捩り（左鉄線）が加わる様に極端な曲げ実験を繰返して再現できなかったが、前述の如く右捩りを加えることにより容易に実現可能である。

なお、ケーブル破壊機構は複雑でオ 2 章 2.3.8 にも述べた如くであるが、当海底線も最も皺がひどく 73 枚中 35 枚も裂傷を生じた赤心が破壊せず、これにくらべれば皺の少い青心が破壊したことは、このような挫屈皺や機械的一様性欠除が単純に電気特性と結びつけ難く、かつ、挫屈皺の軽視できないことを示している。

また、全くの推測ではあるが当ケーブルは一旦右キンクが生じた後に解けたものではないかと考える。ちなみに当ケーブルは割入線で一端接続后投入し、ふたたび、他端接続のため、引上げている。事故点の接続ヶ所迄の距離は約 50 m、海底より船上迄の距離は約 40 m であつた。鉄線は二重同方向左捩りで、右キンクの場合は左キンクに比して解けやすい。

つぎに桐ヶ谷氏<sup>等</sup>により明石海底ケーブル（昭 22）について行われたキンク試験および捻合ピッチ変換試験結果<sup>(38)</sup>に新しく考察を加えてここに掲げる。

もちろん、これは捩り挫屈なることを気付かず行われたものである。

1、ケーブル試料 20 KV  $3 \times 60 \text{ mm}^2$  SL 海底ケーブル

第14表 供試ケーブル構造表

構 造	項 目	構造または厚さ(mm)	外径(mm)
導 体		19/2.0	10.0
絶 縁 層		6.5	23.0
内 部 鉛 被		2.0	27.0
外 部 鉛 被		2.0	31.0
テ ー プ 捲			32.0
撚 合			69.0
鉄 線		31/8.0	
外 装			97.4

絶縁層は  $(\frac{1}{4}r)^{\frac{3}{2}} = 0.702$  約1.5%の剪断歪で換り挫屈を起すことを予想されるものである。(オ80図参照)

## 2. キング試験

- (1) 内径 150cm の右キングをつくり、2屯の張力をかけて約5mにつき1回転換った場合

### (結 果)

最外層1枚のみ紙切れを生じ他は異常なし、この場合の剪断歪は1.03%である。

- (2) 内径 100cm の右キングをつくり、2屯の張力を加えてオ85図およびオ86図に示す如く約3.2mにつき1回転換った場合

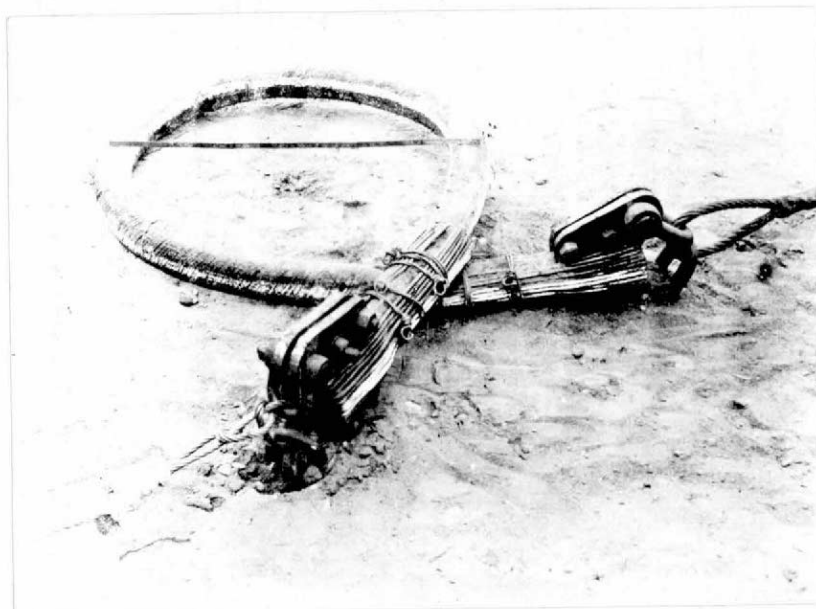
### (結 果)

この場合の剪断歪は1.65%であつて挫屈歪を越しており、オ87図の示す如く、交互捲の左捲部分に相当量の換り挫屈皺発生を見た。この皺の形状はもちろん先に説明したものと同じであり、右捲の紙帯には異常は認められなかつた。また、内外両

鉛被とも異常はなかつた。

以上の如くケーブルがキンクを受けた場合は鉛被よりも先に絶縁層が挟り挫屈により損傷する。その折り歪の限界は前節に掲げた通りである。

オ85図 キンク試験状況 (その 1)

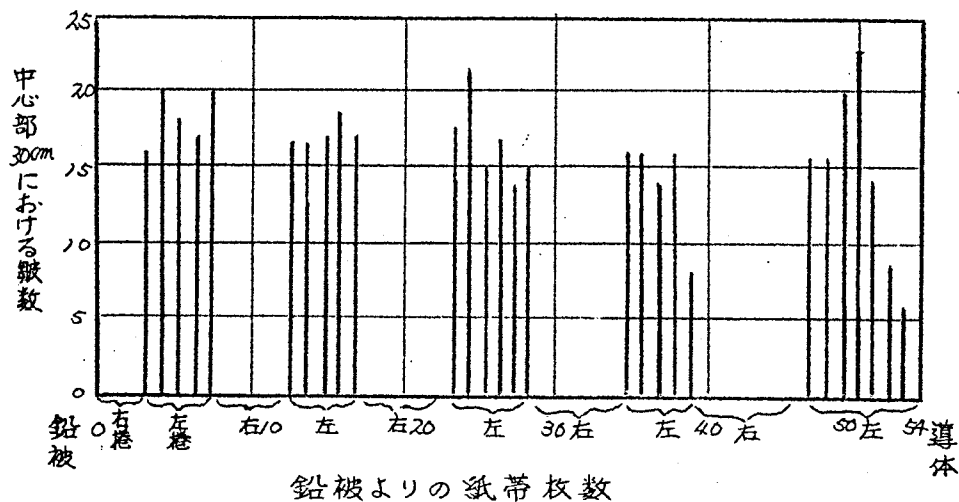


オ86図 キンク試験状況 (その 2)



## 第87図 キンク試験における皺発生状況

(赤心の例)



### 3. 燃合ピッチ変換試験

三心海底ケーブルの工場接続および修理接続を行う場合には、燃合ピッチを一時的につめ、接続完了后元に戻すことが必要である。

試験は試料を  $0^{\circ}\text{C}$  の水中に2時間保持した后、室温にて燃合ピッチを  $50\text{cm}$  および  $70\text{cm}$  につめ、翌朝  $150\text{cm}$  の燃合ピッチに戻した后、3本別々に直線状に伸ばした。

(結 果)

ピッチ  $50\text{cm}$  のものは左巻の紙帯に無数の皺を生じ、紙切れも相当甚だしかつた。ピッチ  $70\text{cm}$  のものは皺は生じたが(ケーブル  $30\text{cm}$  につき各紙帯とも10ヶ以内)紙切れは僅少であつた。また、この時の鉛被もなんらの異常を認められなかつた。

ピッチ  $70\text{cm}$  につめた場合の振り剪断歪は燃返しつきに振つた場合  $0.1\%$ 、燃返しなしの場合は  $7.3\%$  であり、ピッチを  $50\text{cm}$  につめた時はそれぞれ  $0.27\%$  および  $10.1\%$  である。従つ

て燃返しありに近い場合は相当程度迄ピッチをつめて差支えないが、燃返しなしに近い場合は少いピッチ変換でも危険であることが分る。

これに留意したほぼ同様なケーブルの実験では、この程度の短ピッチでも何らの損傷を見ていない。(35KV 120mm<sup>2</sup> ケーブルでピッチ 60cm 迄)

手作業であるから特にこの点を留意し、充分の余裕をもつことが必要であろう。

なお、キンクテスト同様鉛被の折り挫屈歪は絶縁層のそれより高く、これにより制限を受けないことを再確認できた。

### 3.3.6 ケーブル絶縁層の折り挫屈特性の向上について

折りの場<sup>合</sup>は生紙、油浸紙とも折り挫屈に注目する必要がある。

積層円筒の折り挫屈は、オス章 2.3.7 に示した曲げの場合と全く同じ方法によりその特性を向上させうる。ただし、油浸紙の場合は肉厚、半径比の増大による特性向上は期待できない。

折りにより受ける歪は燃合ピッチの増加および燃返しにより、これを減少することができるが、燃合ピッチの増加は燃合本来の効果を減少するから挫屈との関係を勘案して決定せねばならない。

後章に示す如く燃返しのない場合、コアーは燃合方向にノピッチ当り  $2\pi \sin \beta$  ( $\beta$  はピッチ角) だけ折れる。又電力ケーブルで一般に採用されて居る燃返しはノ回転ノ回であるから反対方向に  $2\pi \left( \frac{1-\sin \beta}{2} \right)$  だけ折れる。ケーブル燃合せのピッチ角は通常  $70^\circ$  より大きいから燃返しは折り歪の減少に効果があり、大導体の場合はこれにより折り挫屈を防ぐ事が必要である。

折りは等方性円筒の時と同じく曲げ挫屈を助長するから燃合せ前後のド



ラム茎についても考慮を払わねばならない。

また、油浸紙の場合内部応力緩和により挫屈変形を直すことはできない。

### 3.3.7. 積層構造絶縁層の将来性

オ2章およびオ3章に亘り積層パイプとしての絶縁層の性質につき説明を行ったが以下この構造の将来性について略述し参考としたい。

電力ケーブル絶縁層には現在等方性構造（ポリエチレン、ブチルゴム等）および積層構造（油浸紙等）の二者が採用されている。

積層構造は積層間隙およびテープギャップの存在により電気特性を下げるが、他方均質という点で、却つて利点がある。

一方等方質構造は構造上簡素という点で優れており、製造工程にも利点があるが、等方質材では工程途上必ず流動状態が存在する。たとえば、ポリエチレンにあつては押出し被覆の際、ブチルゴムでは加硫時このような状態となる。

従つて凝固して固体となる際ボイドを生じやすい欠点がある。この発生原因には押出後の冷却時外部より順次冷却結晶化して行く際の体積変化によるもの（ポリエチレンはこれが主因である）、吸蔵ガスによるもの（ブチルゴムでは種々のガスを吸蔵する充填剤を含み、かつ、押出時それを放出する程にゴムの粘度を下げうる高温にできない）等がある。

ケーブルは長尺物であり、1ヶ所の欠陥も全体の機能を停止させる。従つてこのようなボイド発生の傾向はその発生ヶ所およびその大きさを抑え難いことと相俟つて、等方質絶縁層ケーブルの使用電圧の高圧化をさまたげている。これらケーブルが短ピースでは好成績を示しながら使用上は紙ケーブルに比して不安定であるのは、これによるのである。

従つて、今後も特高圧ケーブルには積層構造（材質は紙以外のものの

普及も考えられる)が採用されるものと考ええる。

また、一方等方性絶縁層も製造方法、材料について、ボイド発生を少なくする方向に研究が進むものと思う。

なお、積層絶縁層はスパイラル構造の集合でもあるので、後章に述べる如くスパイラルの性質をも表わす。

### 3.3.8. 結 言

本節においてはケーブル絶縁層円筒の捩りにつき研究を行った。

生紙絶縁層、油浸絶縁層および両者の心線を有する場合につき実験を行い、それぞれ軸方向圧縮挫屈と全く対応する結果をえた。これによりパイプ材質ないしは構造と挫屈様式との関係に關する示唆が得られた。

生紙の場合の特性は、特に挫屈しやすい次章扇形ケーブル捻合時の挫屈問題研究の基礎となるものと考ええる。

油浸紙の場合は曲げ同様心線の存在により特性が向上し、更に鉛被を有する時は捩り挫屈により特異な皺を生ずる。これにより、従来解明出来なかつた海底線事故状況の一つを再現できたものと考えられる。

また、油浸絶縁層の捩りは曲げの時と異なり、挫屈限界は鉛被より小さく、これにより捩りの大きさが制限されるが、この許容捩り量を明らかにすることにより、捻り合せピッチ変換作業等の基礎資料を得ることができた。

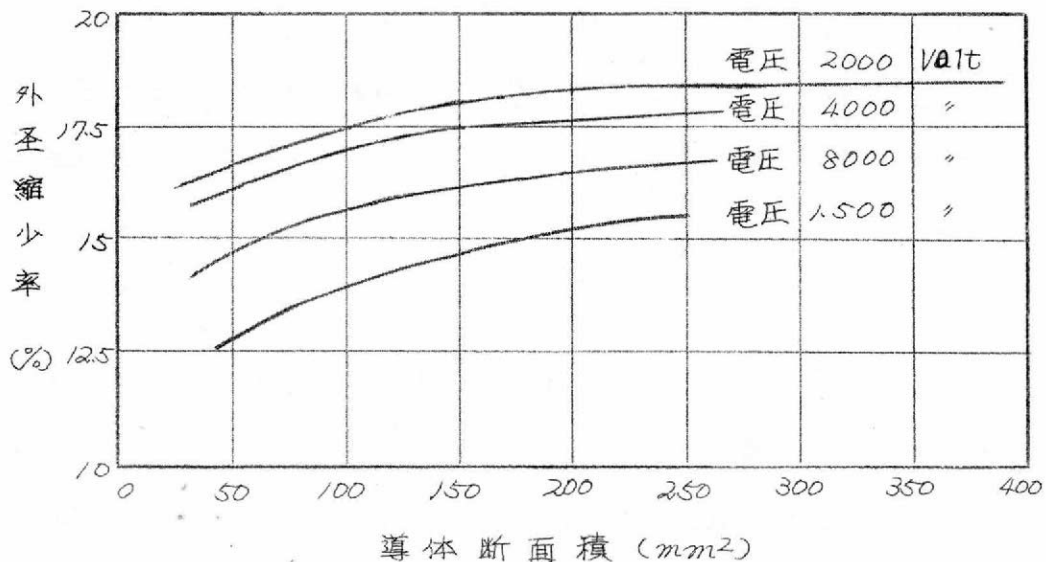
## オ4章 電力紙ケーブルに見られる非円形断面筒殻について

### 4.1. 緒 言

電力紙ケーブルには円筒殻のほか半円形、扇形、楕円形の如き非円形断面の筒殻がある。

3心ベルトケーブルおよび3心片ケーブルの場合は、オ88図の如く外圧縮少の理由から扇形または楕円形導体が採用され、コンプレッションケーブルでは外圧による不規則な挫屈防止と負荷増加による体積膨脹を断面変

オ88図 円形ケーブルの外径(鉛被内径)に対する扇形ケーブル外径の縮少率



オ89図 扇形三心ケーブル



形で補償するため、楕円形コアを用いる。これら非円形筒殻では円筒殻に比しパイプとしての特性が悪く、円形ケーブル以上に挫屈皺発生の問題が起きやすいので、これを改良すべく機械的にも電氣的にもいろいろ工夫がなされている。

ここでは非円形断面の代表例として最も応用面の広い扇形筒殻を主に研究を行った。実験に用いたサンプルの紙巻条件は円筒の場合と同じである。

#### 4.2. 扇形筒殻の曲げ

非円形断面筒の曲げについては電力紙ケーブル以外でも殆ど研究されておらず、O.S. Heck 氏の研究があるのみである。Heck 氏によれば、炭肉楕円筒の場合、円筒と同じく曲率が大きくなるに従って断面の扁平化を伴い曲げ剛性が低下する。そうして屈服に達する前に局部挫屈を起す。(39)

扇形絶縁層で問題となるのは生紙の場合であるが、生紙扇形筒の圧縮では内方変位の非対称弾性域挫屈の様相を示し、曲げによる局部挫屈変形と同様であるので、円筒の場合の如く曲げの問題は圧縮挫屈で置き換えて実験できる。

非円形筒殻の圧縮挫屈は Timoshenko 氏、渋谷氏の考察ならびに実験がある。(1)(40) これらによれば非円形断面筒の場合は殻中の曲率が最も小さいところで挫屈し、楕円筒で挫屈応力度を求めるには円筒の場合の半径の代りに短径部分の曲率半径を用うれば良いとしている。扇形ケーブルの場合は構造が複雑で、扇形の背側（燃合せて外部に出る部分の通称）の曲率半径が大きい、山側の両斜面には直線部に近い部分も存在する。従って最小曲率を算出することは困難であり、実験においては円筒の時の中心半径  $r$  の代りに扇形長短両径方向の絶縁紙筒中心半径の平均値により整理した。また、紙厚  $t$  も長径方向、短径方向の平均値をとった。

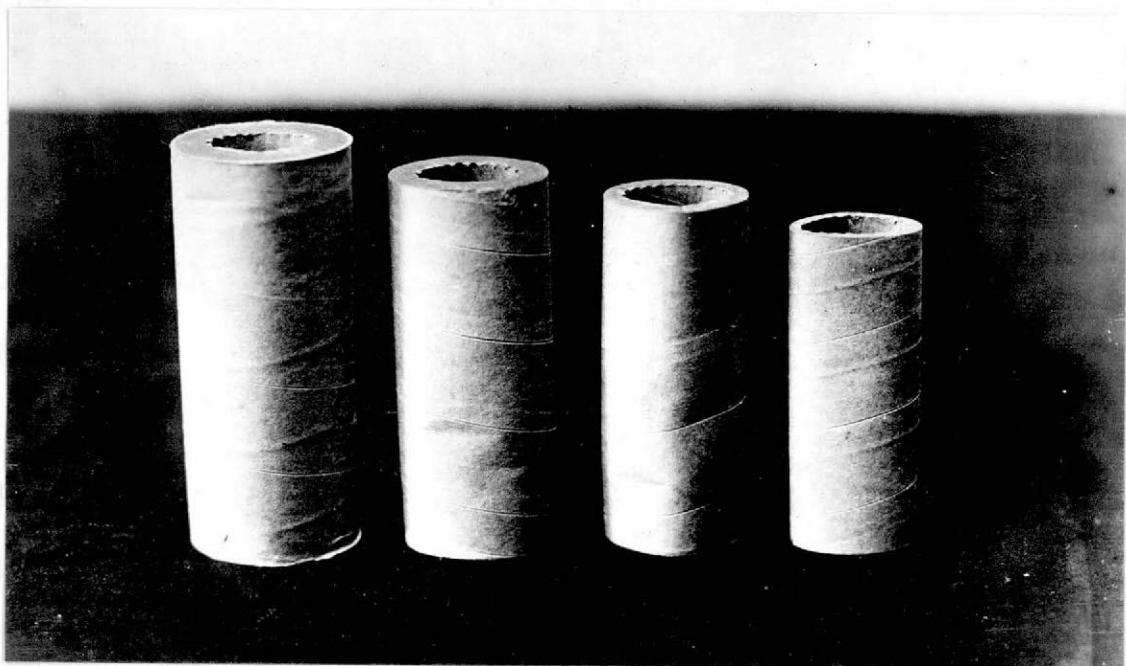
試料は扇形導体内にスパイラルを挿入し、これを利用して導体を抜きと

ることにより作成した。

挫屈部分は主として扇形の背側であるが、山側で挫屈するものもある。  
試験後の試料をオ 90 図に示す。またオ 91 図は 20 KV 扇形  $250 \text{ mm}^2$   
のケーブルを、 $1100 \text{ mm}$  のドラム巻に巻きつけた時の状況であるが、実  
際のケーブルでもこのように山側、背側の両方に曲げ挫屈を生ずる。

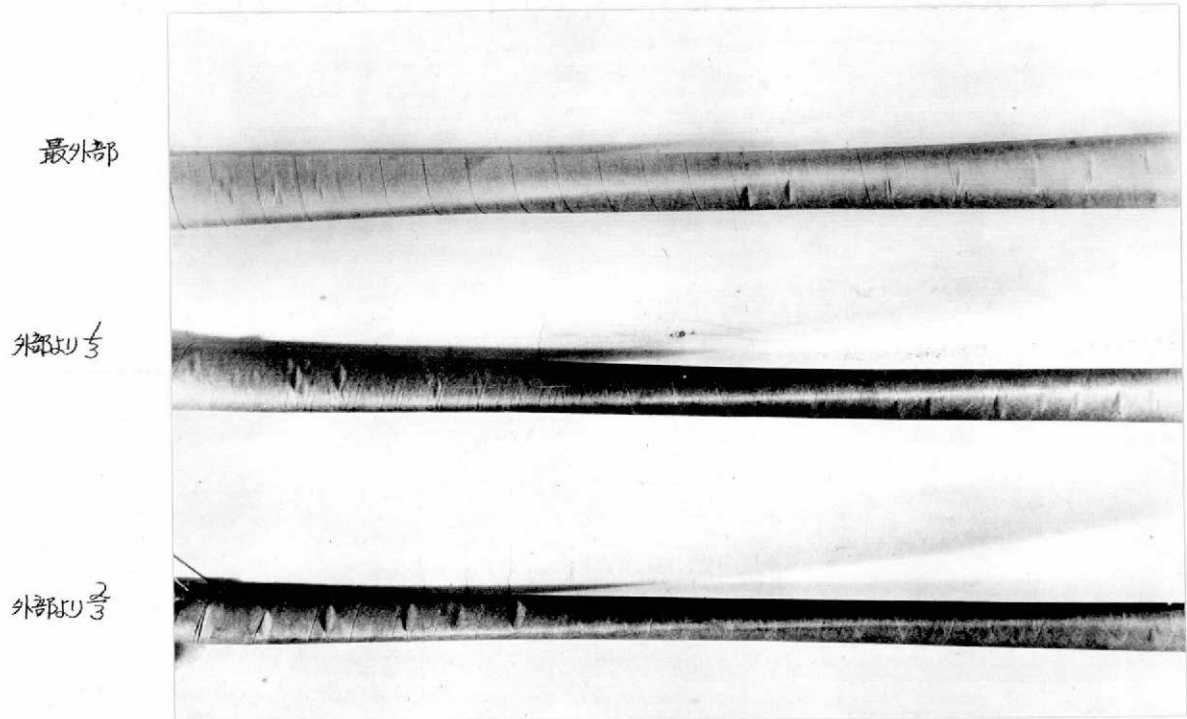
図において、上段は絶縁遮蔽直下、中段は外側から  $1/3$ 、下段は  $2/3$  の点  
におけるものであるが、円筒の場合と同様に変形は内部迄達している。

オ 90 図 実験に用いた扇形絶縁紙筒

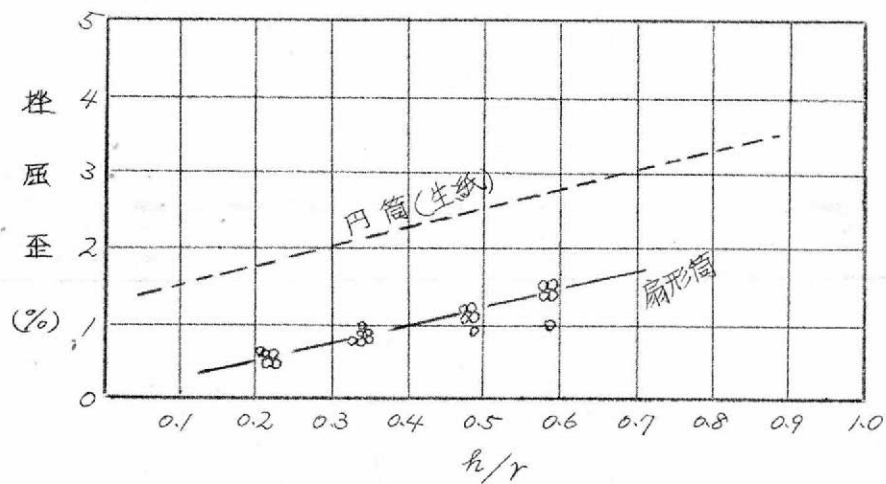


オ 95 表に実験の詳細を、オ 92 図に挫屈歪  $-\frac{h}{r}$  特性を示す。扇形導  
体形状は導体サイズにより、必ずしも相似でなく、また、紙厚（電圧）に  
よつても変るので一率に整理することはできないが、オ 92 図に見る如く  
円形筒の時に比し挫屈歪は相当低く約  $\frac{1}{2}$  である。

オ 91 図 扇形ケーブルの曲げ圧屈



オ 92 図 圧縮圧屈歪 -  $h/r$  特性  
(扇形生紙筒)



すなわち円形導体の時と同程度の圧屈皺発生にとどめるためには約2倍の胴径のドラムに捲く必要がある。従つて圧屈皺の発生はある程度止むをえず、次頁の捩り圧屈とも合せ考え、使用電圧が高くなるに伴い扇形を楕円形に近づけることが必要である。(低圧ケーブルでは機械的な面から電圧

の割には紙厚が厚く、とつてあるので、電気的な支障を起す心配は少ない。

なお、遮蔽銅テープは挫屈皺発生条件の向上には役立たない。このテープは絶縁紙と鎧巻され、挫屈皺は生じにくい、その内部は銅テープの存在に影響されないものと考えられる。

表 1/5 扇形生紙筒殻の圧縮試験

交互巻、圧縮スピード 6mm/min

試料番号	試料長 (cm)	絶縁厚		導体		平均紙厚 $h$ (cm)	平均中心半径 $r$ (cm)	$h/r$	圧屈圧縮歪 $\varepsilon$ (%)
		巾 (cm)	高さ (cm)	巾 (cm)	高さ (cm)				
1	7.95	3.4	2.74	2.05	1.30	0.698	1.18	0.59	1.51
2	8.03	"	"	"	"	"	"	"	1.50
3	8.15	"	"	"	"	"	"	"	1.47
4	8.00	"	"	"	"	"	"	"	1.0
5	8.00	"	"	"	"	"	"	"	1.38
6	7.40	3.05	2.40	2.05	1.30	0.525	1.09	0.48	1.08
7	7.45	"	"	"	"	"	"	"	0.94
8	7.45	"	"	"	"	"	"	"	1.21
9	7.40	"	"	"	"	"	"	"	1.21
10	7.42	"	"	"	"	"	"	"	1.08
11	6.95	2.73	2.00	2.05	1.30	0.345	1.01	0.34	0.86
12	6.97	"	"	"	"	"	"	"	1.00
13	6.98	"	"	"	"	"	"	"	0.86
14	6.92	"	"	"	"	"	"	"	0.87
15	7.00	"	"	"	"	"	"	"	0.86
16	6.40	2.42	1.10	2.05	1.30	0.193	0.933	0.21	0.63
17	6.50	"	"	"	"	"	"	"	0.62
18	6.32	"	"	"	"	"	"	"	0.63
19	6.55	"	"	"	"	"	"	"	0.61
20	6.45	"	"	"	"	"	"	"	0.62

### 4.3 扇形筒殻の捩り

扇形導体、楕円形導体、半円形導体はパイプ型ケーブルの場合を除いては燃合外径の縮少を目的としているので、必ず燃合せ作業工程を経る。この場合の絶縁層は常に生紙であり、扇形油浸絶縁層および乾紙絶縁層を燃合することはないので、生紙の場合についてのみ述べる。

電力紙ケーブル以外での非円形断面中空筒の捩り研究については、池田氏および渋谷氏のものがある。(41)(42)(43) これはいずれも、捩り屈服現象についてであって、この時は断面変形が断面積を小さくするように起り、捩りモーメントの増大に対し捩り剛性減少も大となり、ついに、最大捩りモーメントに達して屈服する。ケーブル絶縁層扇形中空筒の捩りでは、このような現象は生じないで挫屈現象を起し、円筒の場合と同じ内方変位を生ずる。ただし、円筒の場合の様に螺旋状変形を完全につくることは困難である。

内部心線を有する生紙扇形筒の場合も生紙円筒の場合と同様に螺旋状外方変位を生ずる。しかし円筒と異なり最初に生ずる挫屈波は最も優勢であるが、捩りを加えるとともに螺旋状挫屈波の間に何本かの波が増加する。この状況をオ 93 図(上段背側、下段山側)に示すが、この点は心線を有する油浸円筒と同じである。

オ 93 図 扇形生紙ケーブルの捩り挫屈

上 段 背 側  
下 段 山 側





扇形生紙中空筒についての実験結果をオノ表およびオノ94図に示す。  
バラツキは大きいがこの場合は円筒に比し  $\frac{5}{3} \sim \frac{3}{4}$  の挫屈歪を示した。

また交互方向捲と同方向捲とでは有意差は見られなかつた。同方向捲（左捲）では左振り（締めり方向）が右振り（弛み方向）に比して振つた際の積層条件が良いため、大きな値が得られるであろうと予期して実験した。予想通りの傾向は示したが、両者の差は少く、サンプル数も少いので、そのように判定を下すことは困難である。内部に燃線を有する場合の実験結果をオノ7表およびオノ95図に示す。この場合の燃線は右燃りである。（ケーブル導体は国内では最外層右燃りすなわちS燃りと定められている）この場合も円筒の時の約  $\frac{3}{4}$  の挫屈歪を示し、扇形筒殻の振りも円筒と同じく生紙では内部燃線の存在による挫屈歪の向上は少い。試料数は少いが予燃り（後出）のある場合とない場合では有意差は認められず、また、燃線方向の右振および左振試験に及ぼす影響も少い。

これらの実験からも、非円形断面の時は曲げの場合と同じく殻中曲率の最も小さいところで挫屈し、円筒の半径の代りにその部分の曲率半径を用いるとの考え方を適用できると思う。ただし、扇形ケーブルの場合、構造が複雑で最小曲率の決定には困難がある。

扇形ケーブルは普通曲げによる挫屈を完全に除くことは難しいので、振りを受けた場合、オノ93図の如き完全な振り挫屈は起りにくく、オノ96図またはオノ97図の如く曲げ挫屈および、振り挫屈の両方が重った変形をなす。

オノ97図は前掲のオノ91図のケーブルを  $m$  当り  $66^\circ$  振つたもので上、中、下段はそれぞれ対応する。

図 94 扇形生紙中空筒の捫屈剪断歪 -  $(h/r)^{\frac{3}{2}}$  特性

(予燃なし)

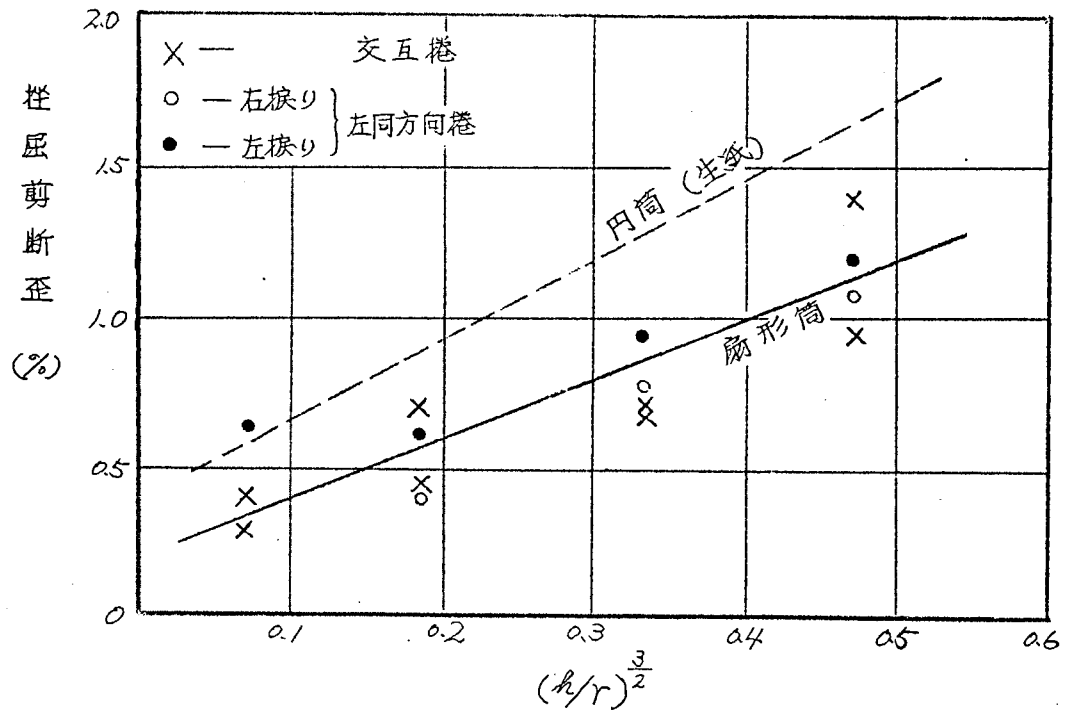


図 95 扇形生紙筒の捫屈剪断歪 -  $(h/r)^{\frac{3}{2}}$  特性

(内部燃線あり、交互捲)

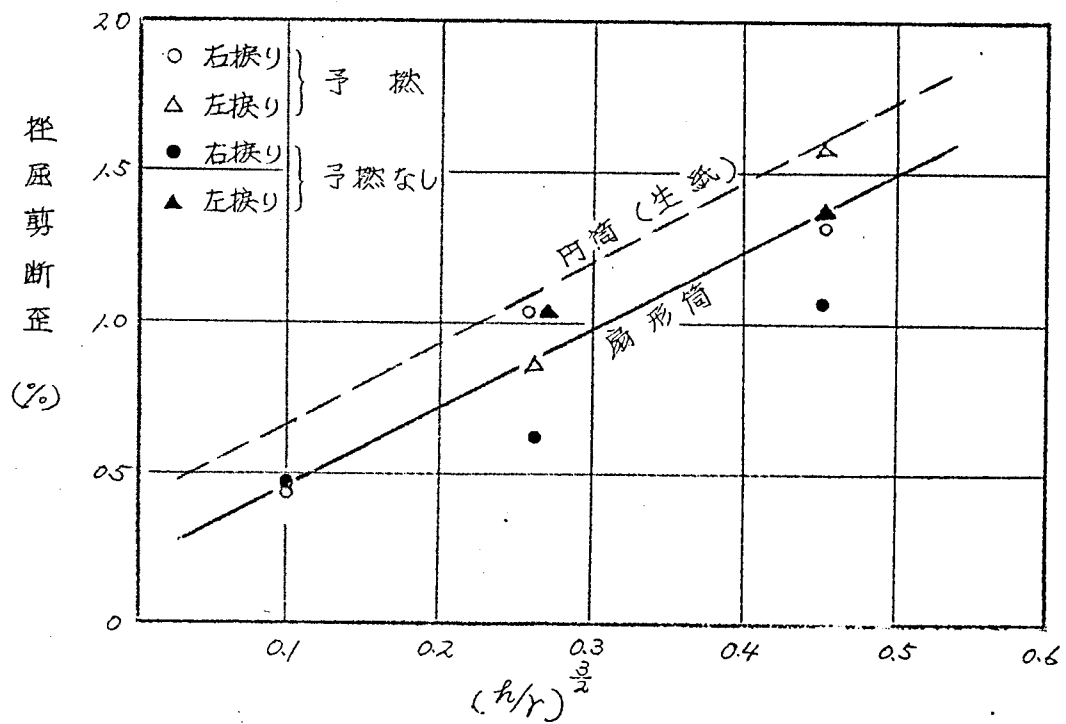


表16 扇形生紙中空筒の折り試験

(予燃りなし、燃りスピード  $3.6^{\circ}/\text{sec}$ )

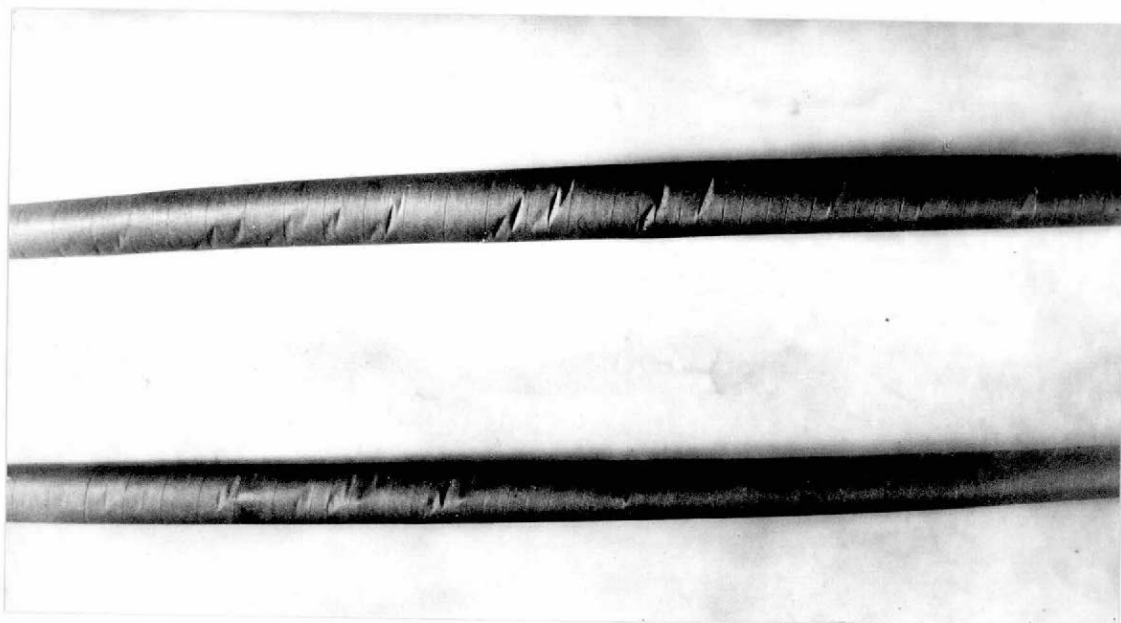
試料 番号	試料長 (cm)	絶縁層		導体		平均紙厚 $h(\text{cm})$	平均中心半径 $r(\text{cm})$	$(h/r)^{\frac{3}{2}}$	圧屈時 折り角度 (度)	圧屈剪断 歪 (%)	折り方向
		巾 (cm)	高さ (cm)	巾 (cm)	高さ (cm)						
1	48.6	3.45	2.75	2.05	1.3	0.712	1.18	0.469	33	1.4	左
2	47.8	"	"	"	"	"	"	"	21.5	0.92	右
3	49.5	3.05	2.40	"	"	0.525	1.09	0.333	17.5	0.69	左
4	48.4	"	"	"	"	"	"	"	17	0.67	右
5	50.0	2.70	1.95	"	"	0.325	1.00	0.185	20	0.70	左
6	48.5	"	"	"	"	"	"	"	12	0.43	右
7	46.5	2.35	1.60	"	"	0.15	0.91	0.067	10	0.34	左
8	49.0	"	"	"	"	"	"	"	8.5	0.27	右
交互方向 捲											
9	47.3	3.45	2.75	"	"	0.712	1.18	0.469	28	1.21	左
10	48.5	"	"	"	"	"	"	"	26	1.10	右
11	49.5	3.05	2.40	"	"	0.525	1.09	0.333	25.5	0.97	左
12	49.0	"	"	"	"	"	"	"	20	0.78	右
13	46.4	2.80	2.05	"	"	0.325	1.00	0.185	16.5	0.62	左
14	47.3	"	"	"	"	"	"	"	11	0.41	右
15	46.5	2.35	1.60	"	"	0.15	0.91	0.067	20	0.68	左
同方向 左捲											

ヲ17表 扇形生紙筒の捩り試験（内部心線あり）

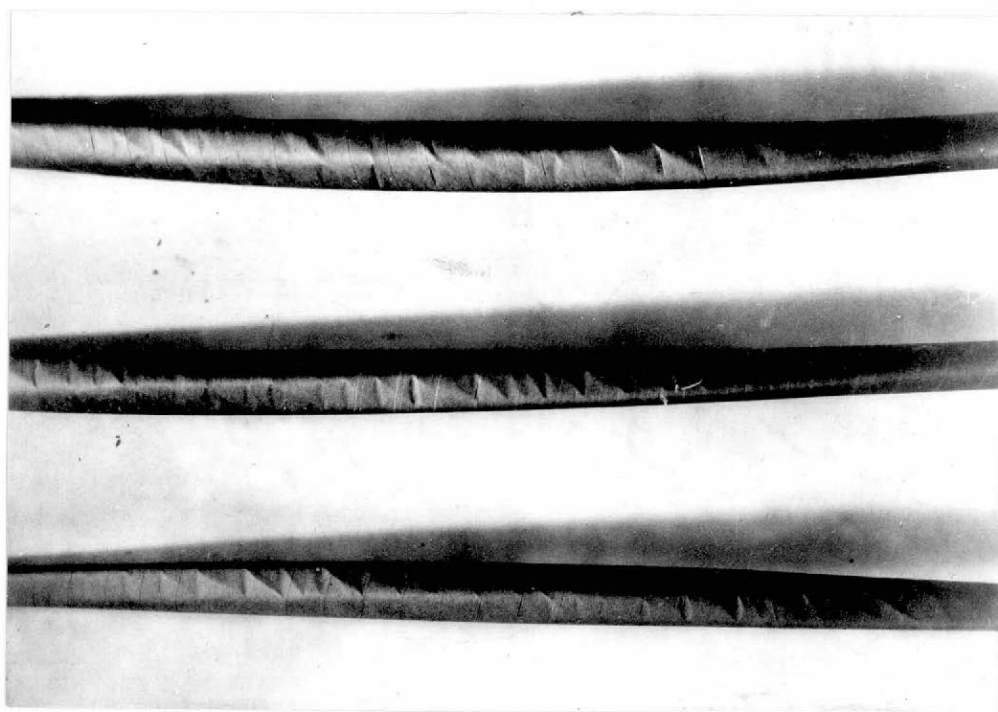
（交互捲、捩りスピード  $3.6^{\circ}/sec$ ）

試料 番号	試料長 (cm)	絶 縁 層		導 体		平均紙厚 $h(cm)$	平均中心 半 径 $r(cm)$	$(h/r)^{3/2}$	捩 屈 時 捩り角度 (度)	捩屈剪断 歪 (%)	捩 り 方 向
		巾 (cm)	高 さ (cm)	巾 (cm)	高 さ (cm)						
1	48.5	3.4	2.74	2.05	1.3	0.698	1.18	0.455	32	1.36	右
2	47.7	"	"	"	"	"	"	"	38	1.64	左
3	48.5	2.9	2.2	"	"	0.438	1.056	0.267	28	1.06	右
4	49.4	"	"	"	"	"	"	"	24	0.89	左
5	48.7	2.47	1.75	"	"	0.218	0.946	0.111	13	0.44	右
											予 捩 り あ り
6	49.0	3.4	2.74	"	"	0.698	1.18	0.455	26	1.09	右
7	49.2	"	"	"	"	"	"	"	33.5	1.40	左
8	50.0	2.9	2.2	"	"	0.438	1.056	0.267	17	0.62	右
9	48.5	"	"	"	"	"	"	"	29	1.06	左
10	49.3	2.47	1.75	"	"	0.218	0.946	0.111	16.5	0.46	右
											予 捩 り な し

第96図 曲げと捩りを受けた扇形絶縁層の挫屈 (その1)

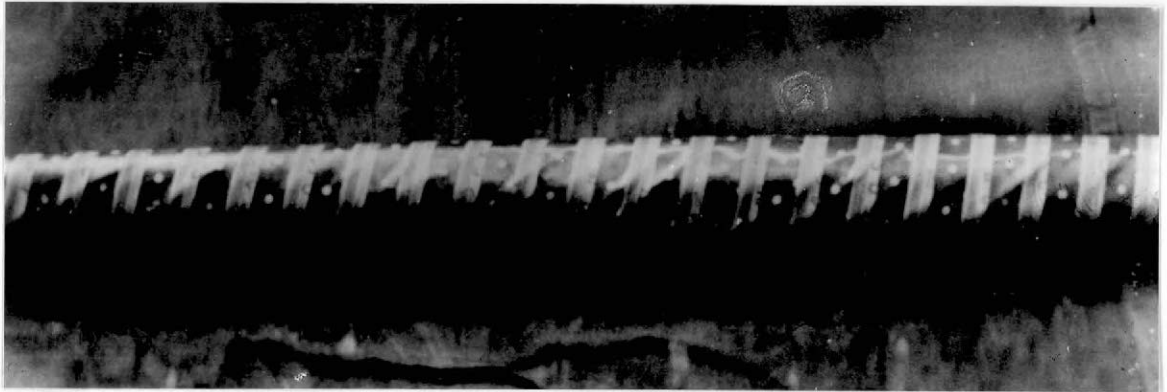


第97図 曲げと捩りを受けた扇形絶縁層の挫屈 (その2)



また、Hケーブルにおける扇形コアの遮蔽銅テープは捫屈特性の向上には役立たず、オ98図の如くに捫屈する。ただし、捲方向と捫方向が反対の場合（弛められる方向の場合）は外部遮蔽銅テープに捫屈皺は生じにくいが、内部は銅テープのない時と同じである。

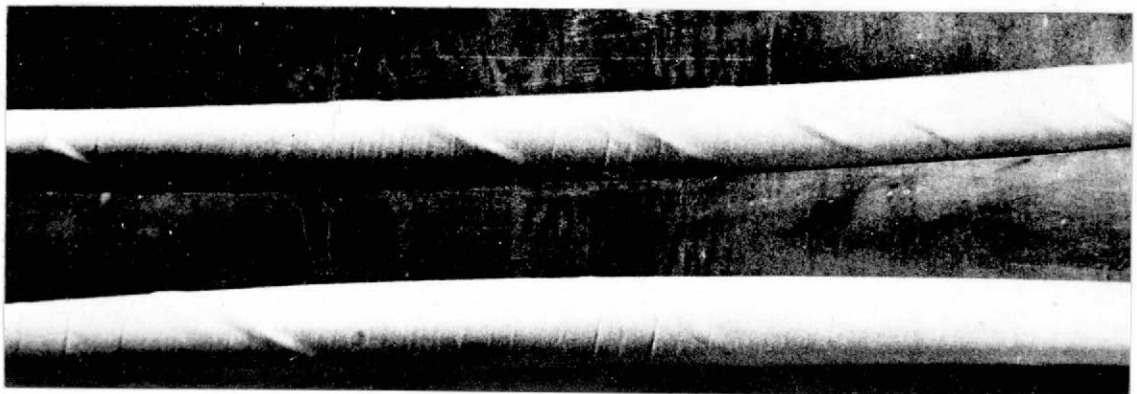
オ98図 遮蔽銅テープをもつ扇形ケーブルの捫り捫屈



なお、楕円形（扇楕円）の場合は円形、扇形の間状態を示し、捫り捫屈状況もオ99図の如くである。（上段背側、下段山側）特に山側は円形に近いので捫屈波の状況も円筒と同様波数が少い。

オ99図 楕円形ケーブルの捫り捫屈状況

（上 段 — 背 側  
下 段 — 山 側



捫り捫屈特性の向上には扇形の形を楕円形に近づけると円筒の場合に述べた如く積層条件を上げることが、有効であるが、撚合方法を改善し

ケーブルに与える剪断歪をへらしたものに予捻り捻線 (Pre-formed Strand) がある。

これはあらかじめ捻合ピッチに相当する捻りを導体に与えて置いて、その上に紙巻してから捻合する方法であつて、British Insulated Cable Co., Ltd. の発明になるものである。この方法により捻屈皺を減じ、22 KV の扇形ソリッドケーブルが安全に使用されるようになった。

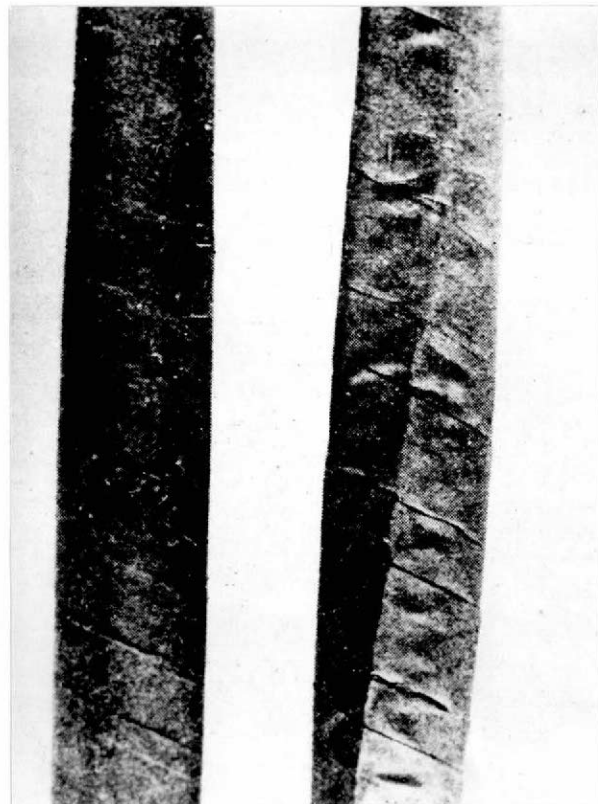
オ 100 図には British Insulated Cable Co. 製の予捻をした場合としない場合のケーブルを掲げた。(2)

しかしこの方法においては予捻ピッチと捻合ピッチがずれた場合、捻合の位相を合すために、コアの一つを進めまたは遅らす必要を生じ、局部的に捩り捻屈が発生する恐れがあるので、新しい捻合機では位相の調節法に種々の工夫が試みられている。

オ 100 図

予捻の有無による比較

( 左 - 予捻あり  
右 - 予捻なし



#### 4.4. 結 言

非円形筒殻たる扇形絶縁層の曲げおよび捩りについて 研究を行つた。実用面から生紙に限つて研究を進めたが、曲げ、捩りの両者とも生紙円筒に全く対応する結果を得た。

また扇形の場合は曲げ、捩りとも円筒に比して捩屈特性は悪く、それぞれ約  $\frac{1}{2}$  , 約  $\frac{3}{4}$  の捩屈歪を有することが判明した。捩りの場合には紙捲方向、捩り方向捻線の存在、捻線の捻方向、予捻の有無による影響は少い。

捩屈特性の向上には円筒の場合と同様積層条件をあげることと、当然のことではあるが楕円形に近い型をとることが有効である。

以上により、燃合時における扇形絶縁層の捩屈防止に関する基礎資料を得ることができた。



## 第5章 外圧を受ける電力紙ケーブル円筒殻の変形について

### 5.1. 緒 言

電力紙ケーブルでは内部に固いケーブル心を有するため、外圧に対しては通信ケーブルに比して格段に強く、変形が問題となることは非常に少い。

しかしながら電力紙ケーブル鉛被でもる心ケーブルの如く変形しやすいものは後述の如く實際上にも変形が問題となり、単心ケーブルでさえ条件によつては圧潰の可能性がある。

アルミ被の場合は鉛被に比して圧潰強度は 5—6 倍大きく、問題となることは全くないので、<sup>(44)</sup> 以下鉛被についてのみ述べる。

### 5.2. 空鉛筒の外圧による<sup>(46)</sup> 挫屈変形

空鉛筒については主として通信ケーブルに應用する目的で、ケーブル界でも以前から多くの人により外圧実験が行われている。これは電力紙ケーブルに対しても基礎となるものであると考えるので、簡単に紹介したい。

長い円筒に外圧  $p$  を加える場合、周方向に  $p \cdot \frac{r}{h}$  の圧縮応力が生じ、外圧を次第に大きくすると、この圧縮応力のために円筒は安定を失い挫屈を起す。

この問題研究の正史は古く、H. Bryan 氏 (1888)、R. Lorenz 氏 (1911)、R. V. Southwell 氏 (1913) 等多くの研究がある。円筒の長い場合、挫屈応力は円環の外圧による挫屈応力の表式と同形になる。

すなわち、周知のように 挫屈外圧  $p_{cr}$  は

$$p_{cr} = \sigma_{cr} \times \frac{h}{r} = \frac{E h^3}{4(1-\nu^2)r^3}$$

ここに  $\sigma_{cr}$  : 挫屈圧縮応力

$E$  : ヤング率

$\nu$  : ポアソン比

$h$  : 管の肉厚

$r$  : 管の平均半径

上記は圧縮応力が比例限度以下にある場合に関り適用され、比例限度を超える時はこの式の値は過大であり、この場合は挫屈外圧として

R.V. Southwell 氏が次式を与えている。(45)

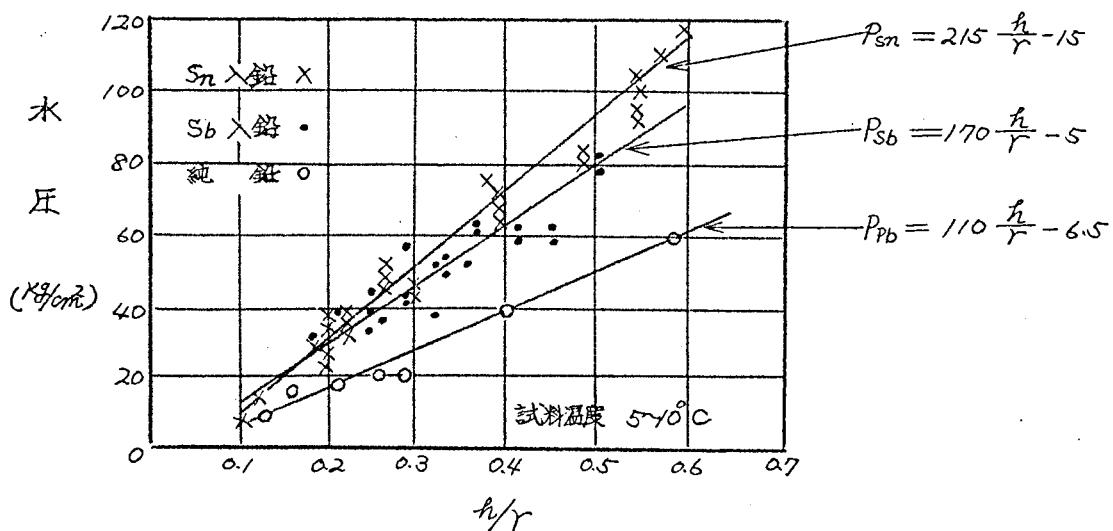
$$P_{cr} = \frac{h}{r} \cdot \frac{\sigma_{yp}}{1 + 4 \cdot \frac{\sigma_{yp}}{E} \left( \frac{r}{h} \right)^2}$$

ここに  $\sigma_{yp}$  : 降伏点応力

鉛被の場合は勿論弾性限外で、元木氏によれば  $1 \text{ Kg/min}$  昇圧の短時間試験による挫屈外圧は、オ 10 / 図の如くである。(46)

ヤング率  $E = 15 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$  として Southwell の式から逆算したところでは、実験範囲での降伏点応力の平均値は純鉛約  $90 \text{ Kg/cm}^2$ 、アンチ 1% 入合金鉛約  $170 \text{ Kg/cm}^2$ 、錫 1% 入合金鉛約  $160 \text{ Kg/cm}^2$  であるが、 $h/r$  により相当な差を生じ、 $h/r$  が大なる程降伏点応力が大となつていゝる。他の実験においても同様な結果が得られ、かつ、 $h/r$  による同じ傾向が見られる。

オ 10 / 図 各種鉛被の耐外圧力比較



長時間試験の場合は下記の実験式が求められている。

$$T = \frac{t_c}{P - P_0} e^{-a(P - P_0)}$$

ここに  $T$  : 破壊に要したる時間

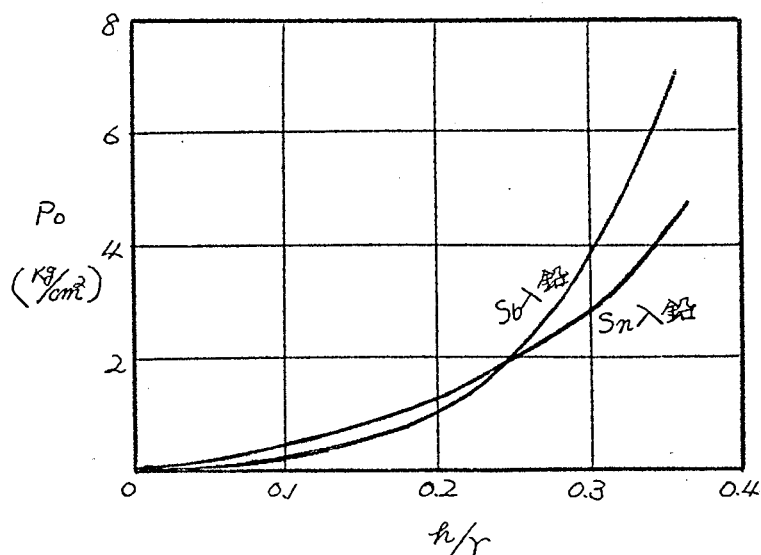
$P$  : 加えられたる圧力 ( $\text{Kg/cm}^2$ )

$P_0$  : 定数 (匍匐限界を示すものと推測さる)

$t_c, a$  : 定数

すなわち空鉛筒の場合はクリープのため、常用しうる圧力は極めて低く、上記実験式から得られた匍匐限界はオノ図の如くである。

オノ図 匍匐限界と  $t_c/r$  の関係



従つて当然のことではあるが、電力ケーブルの場合 (一般に  $\frac{t_c}{r} < 0.2$ ) でも三心ケーブルの場合や鉛被、絶縁体間に間隙を有する場合には、条件によつては圧潰する。

### 5.3 単心電力紙ケーブルの外圧による変形

単心電力ケーブルで最も大きな外圧を予想される場合は海底布設である。

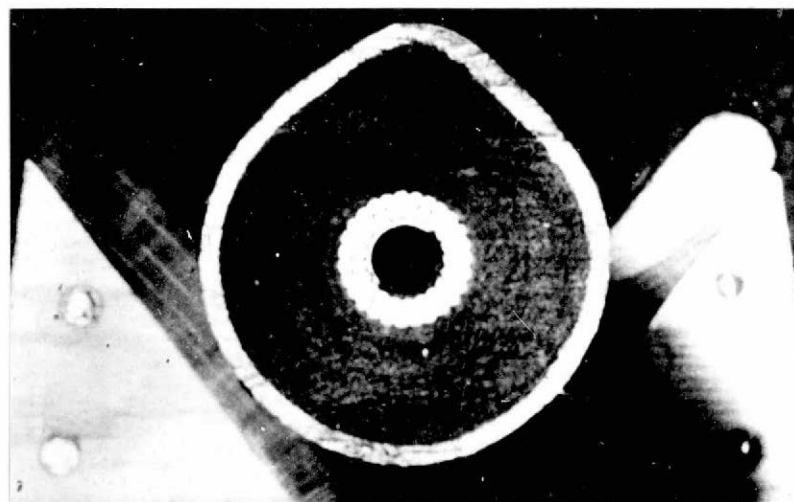
通信ケーブルでは水深約 40 m 迄は無補強で、それ以下の深さに布設さ

れる場合は鉛被内に補強帯を設けている。電力ケーブルで我国に布設されたものでは、単心 OF ケーブルおよび単心<sup>ソリッド</sup>ケーブルで 110 m、3 心ケーブル (SL) で 70 m が水深の最高であるが、今迄に補強帯を設けたものはない。

単心ケーブルは固い内部コアを有するので、外圧による挫屈値は楕円変形を妨げられて当然上昇する。そうしてその変形様式は一変して、オ 103 図の如き外方変位挫屈となる。

図は条件の特に悪い太物である 275 KV 200 mm<sup>2</sup>、OF ケーブル (外径約 70 mm) を外圧により圧潰させたものであるが、短時間テスト 13 kg/cm<sup>2</sup> で圧潰した。この大きさの空鉛筒では短時間テストで約 6 kg/cm<sup>2</sup> で圧潰するから約 2 倍に圧潰外圧は上昇している。

オ 103 図 単心 OF ケーブルの外圧による変形



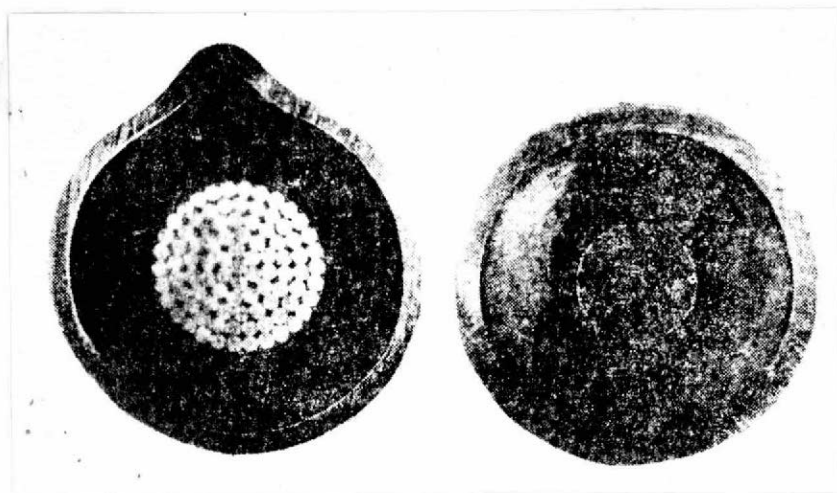
変形状況から考えて圧潰外圧は絶縁層固さにも左右されるが、特に鉛被の締め代の大小は外圧挫屈を誘発するものとして、大きな影響をもつことと思われる。

海底ケーブルはその使用目的から 100 m を越す水深に布設される場合は極めて稀であり、条件の悪い超高压ケーブルは深海に布設されることも

なく、また、上述の外方変位は外部鉄線に押えられて耐水圧はさらに上るので、補強帯を考慮する必要はないと考えてよい。

外国文献においても外圧による電力紙ケーブルの変形について触れたものは殆ど見当らぬが、1956年のVancouver島への138KV海底ガスフィールドケーブルでは200m近い水深のため、特に予備テストを行い、鉛被下のガス通路を考慮した弛い鉛被の古い型（オ/04図左、 $22\text{kg}/\text{cm}^2$ 加圧により挫屈）から鉛被の締めを充分にして、（オ/04図右、 $37\text{kg}/\text{cm}^2$ 7日間加圧で変形せず）内部中空ガス通路を設ける設計に変えたことが報告されている。<sup>(47)</sup>

オ/04図 ガス・フィールドケーブルの外圧による変形



なお、コンプレッションケーブルでコアを楕円または三角とするのは、外圧（ $15\text{kg}/\text{cm}^2$ ）による上述の如き不規則挫屈を避けることが一つの理由である。

#### 5.4. 3心電力紙ケーブルの外圧による変形<sup>(48)</sup>

海底ケーブル布設工事の困難はケーブル重量に比例するので、3心ケーブルは歓迎されない。今迄ベルトケーブル、SLケーブルの海底布設例も多いが、これとても最近ではゴムケーブルに移行する傾向にある。

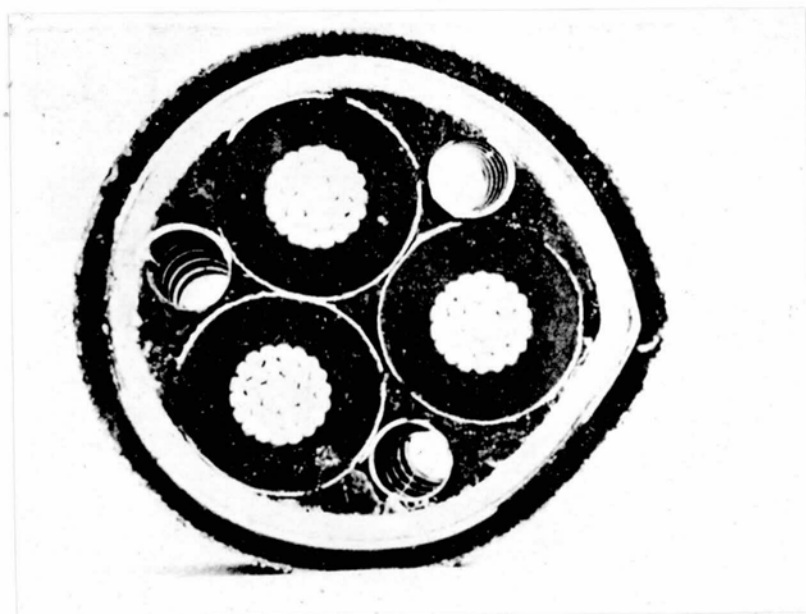
S L ケーブルは外圧に関しては単心ケーブルとして扱うべきであり、ベルトケーブルは海底線としては 3000V 級に用いられるにすぎず、小型かつ内部が充実しているので、単心ケーブルに近い耐外圧を有する。

また、O.F ケーブル、H ケーブルの如く共通鉛被をもつ 3 心ケーブルは、布設に至る迄の機械的不安から、深海ケーブルとして使用されることはない。

しかしケーブルは製造工程中加硫等で  $51\text{kg}/\text{cm}^2$  程度の外圧を受けることがある。特に 3 心 O.F. ケーブルは扇形導体が用いられないため介在部が多く、鉛被と燃合ユアーとの接触程度、鉛被の変形度において単心ケーブルに劣り、上記の外圧により圧潰する。

3 心 O.F. ケーブルで実験を行つたところでは外圧による変形状況はオ 105 図に示す如くであつた。変形場所は介在部に限らないし、また、オ 105 図の如く、判然とした変形を示さぬ場合もある。

オ 105 図 3 心 O.F. ケーブルの外圧による変形



以下 60 kV  $3 \times 100 \text{ mm}^2$  の OF ケーブルの例について筆者等が行った実験結果を述べる。(48)

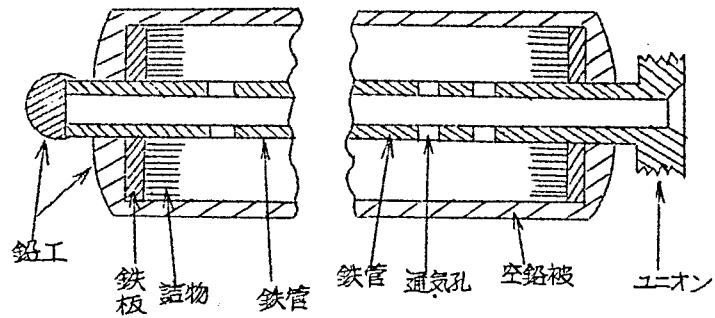
オ/8 表 供試ケーブル構造表

	構成または厚み(mm)	外 径 (mm)
導 体	セグメント	11.6
絶 縁 層	8.0	28.0
三 心 合		61.0
H 金 巾	0.5	62.0
鉛 被	3.2	68.4
N P 引 綿 帯	0.5	69.4
銅 テ ー プ	0.1 × 20 2枚	69.8
真 鍮 テ ー プ	0.4 × 10	70.6
ネ オ プ レ ン	3.5	77.6
ネオプレン引帆布	1.0	79.6

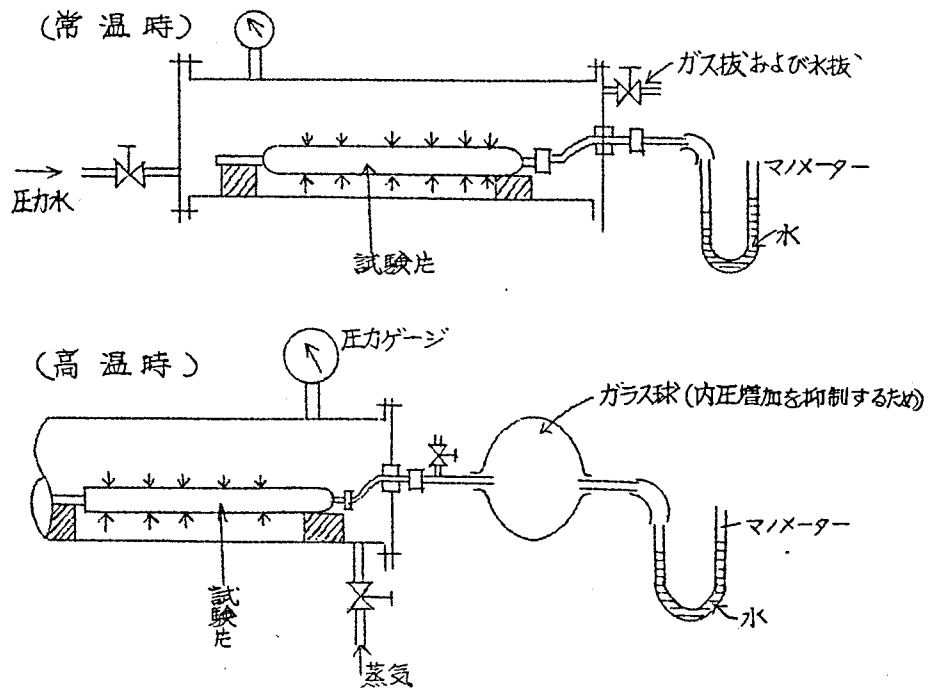
試料長は、鉛被、外装それぞれの挫屈外圧  $r/l$  特性を計算し(ただし、弾性域の場合の式を使用す)、円周方向波数  $n=2$  (楕円変形)に落ちつく長さを求めたところ、 $l/r \geq 50$ 、すなわち、 $l \geq 1.65 \text{ m}$ であつたので、余裕をとつて試料長は  $2 \text{ m}$ を採用した。

空管の場合は軸方向の影響を受けぬよう鉄管を用いて補強した。オ/06 図に縦方向補強状況、オ/07 図に実験装置を示す。マンメーターは外圧変化により外部から挫屈限界を知るために使用した。なお、高温実験のものは温度による内圧増加を抑えるため、マンメーターの前にガラス球を挿入した。昇圧スピードは  $1 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$  である。

オ106図 試験片の形状



オ107図 外圧実験装置概略図



内部コアのない場合の実験結果をオ108図に示すが、低油圧のケーブルの補強帯は外圧による圧潰条件を向上させない。このことはオープンスパイラル状の補強帯の効果がテープ巾とピッチの比、すなわち筒を蔽ふ面積に比例するとして導いた下記の式

$$P_{cr} = \frac{Eh^3}{4(1-\nu^2)r^3} \times \frac{b}{p}$$



ここに  $b$  : テープ巾

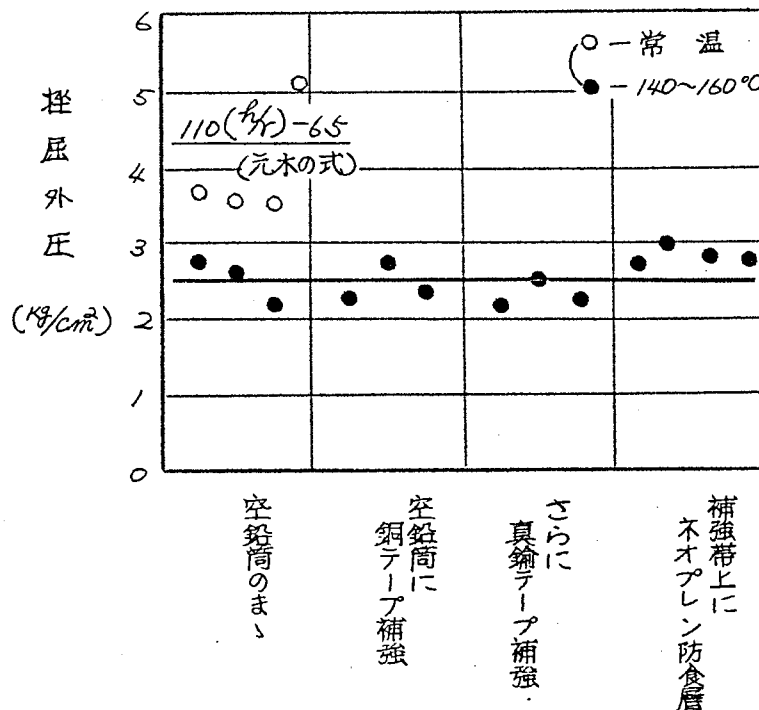
$p$  : ピッチ

または通信ケーブル海底線、水圧補強帯に使用されている実験式

$$P_{cr} = \frac{10}{12} E \frac{h^3}{(2r)^{2.5}} \frac{b}{p}$$

のいずれで算出しても、補強帯全部で  $0.2 \text{ kg/cm}^2$  以下であることから明らかである。

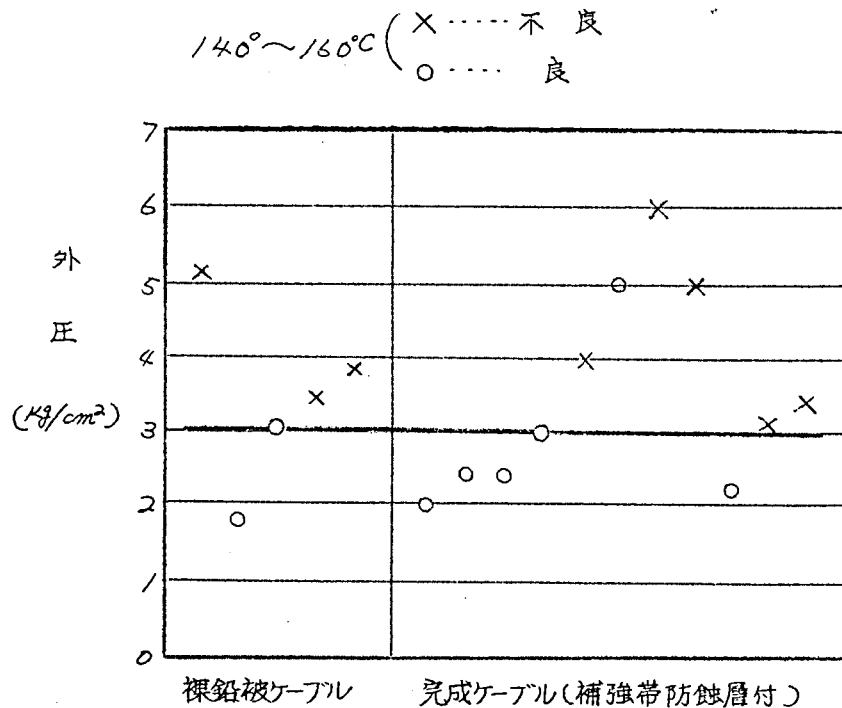
オ/08図 内部コアのないケーブルの外圧試験



140~160°Cの場合は常温に比し約60%に落ちたが、これは鉛の降伏点応力の低下に対応するものである。

オ/09図は内部コアのある時の実験結果であるが、空鉛筒と異なり内圧変動も判然とせず、オ/07図の如くマンメーターによつて外部から挫屈限界を知ることはできなかった。従つて適宜に外圧を加えた后試料をとり出し、ケーブルを解体の上判定した。これによれば内部3心コアの存在により約40%圧潰条件は向上する。

オ109図 3心OFケーブルの外圧試験



また、空鉛筒の時と同様補強帯および防蝕層の有無は圧潰条件に影響しない。

以上により 3心OFケーブル鉛被は高温時(約 150°C)においては、常温空鉛筒圧潰強度の約 80%の強度をもつことが明らかとなり、鉛被内外差圧をこの値以下にする如く内圧を高めることにより、圧潰を防止することができる。他サイズのケーブルも同様の基準を採用し、支障なく實際面に応用し得ている。

## 5.5 結 言

本章においては電力紙ケーブルが外圧を受けた場合につき説明を行った。

単心ケーブルは特別の場合のほか、圧潰の危険はない。

3心ケーブルでは製造中においても圧潰の恐れがあるので、高温時の特性、補強帯の影響、内部芯の効果につき実験を行い、圧潰防止の基礎資料を得ることができた。

## 第6章 電力紙ケーブルに見られる固有応力歪屈

### 6.1. 緒 言

物体は、外力によることなく種々の原因から、内部に固有応力を生じ、この固有応力のために、歪屈を生ずることがある。

電力紙ケーブルにも、このような現象が見られる。以下これにつき記述する。

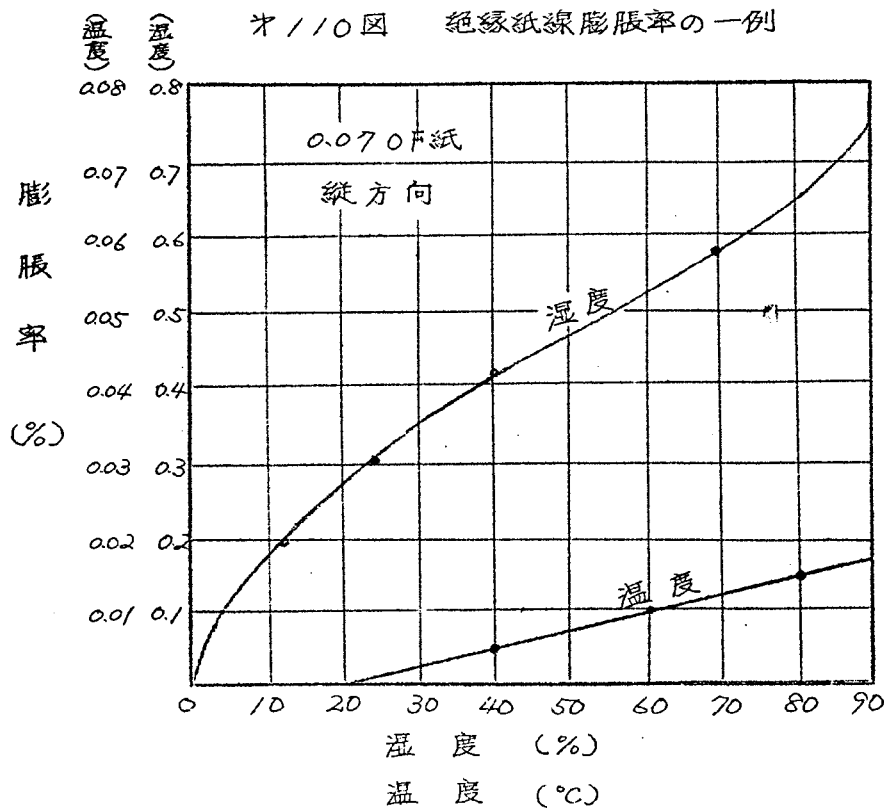
### 6.2. 湿気応力歪屈 (49)

紙は吸湿によつて膨脹し、湿気応力歪屈を生ずる。

その長さ  $X$  は、含湿量  $m$  の増加により、湿気飽和点近くまでほぼ直線的に増加する。(オ/10図 参照)

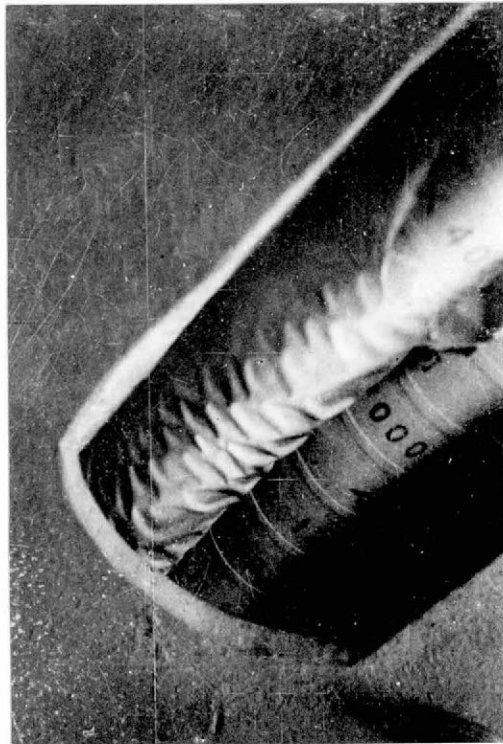
$$\text{すなわち } X = X_0 (1 + \alpha m)$$

ここに  $X_0$  は含湿率0の時の長さであり、 $\alpha$  は吸湿膨脹係数であつて、紙のような異方性材料では、方向により異なる。



広巾の絶縁紙を、ホビン、ケーブル等に巻きつけ、湿度の大なる場所に放置すれば、オノノ図の如き鮮やかなダイヤモンド皺をつくることはわれわれのしばしば経験するところである。

オノノ図 絶縁紙の湿気応力挫屈



電力ケーブルとして纏巻されたものは、湿気の侵入が困難であり、このような現象の生ずることはない。

しかし、含湿率と紙の性質の両方に履歴現象はなく、この湿気応力挫屈も可逆的である<sup>(49)</sup>ことを利用し、逆に機械的に生じた挫屈皺をケーブルの乾燥により消滅させることが可能である。

これには、積層条件を変えることにより、挫屈皺を消滅しやすい形に工夫することができる。

先に述べた絶縁紙の調湿による挫屈条件の向上は、湿気応力挫屈の点でも有利であり、二重の効果がある。

### 6.3 膨潤により生ずる内部応力歪屈<sup>(50)</sup>

電力紙ケーブル防蝕層に用いられるネオプレンゴム層は、化学薬品により膨潤して分子の網目が張りつめることにより、応力を生じ、歪屈を起すことがある。

ゴム分子は網目を形成し、ちぢんだ状態で最も安定であるが、このちぢもうとするエネルギーと、ゴム分子、および液体分子間の相互引力による結合エネルギーが平衡したところで、ゴムは膨潤平衡に達する。

従つて、ネオプレンゴムの膨潤の条件としては、ネオプレンの網目の存在の仕方、およびネオプレンと液体との親和力が関係する。

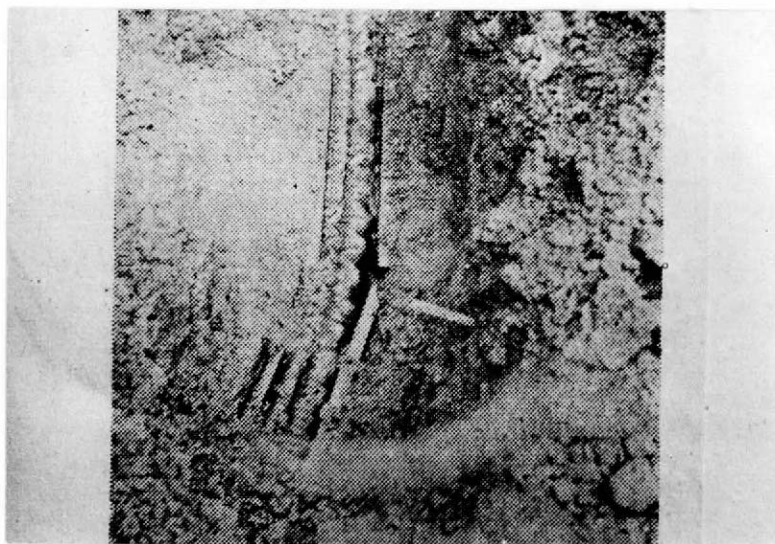
前者に関係するものとして膨潤は、加硫不十分の場合や充填剤とゴムの分子の結合の弱い場合に起りやすい。

後者は、ネオプレンゴムと親和力のある液体が、膨潤の原因になることを意味し、炭化水素油では、芳香族系で分子の比較的小さいもの（ベンジン等）、その他には、塩素化炭化水素油（四塩化炭素等）、エステル類（アセトン等）がこれに相当する。

また、膨潤平衡は、温度にも関係するので、膨潤の度合は温度の函数でもある。

オノヅ図は、芳香族系油の流れ込む場所に布設された実際のケーブルのネオプレン層に生じた膨潤による内部応力歪屈の状況で、無数の皺を生じ極端な場所ではオノヅ図の如くゴム層の切断に至る場合もあつた。<sup>(50)</sup>

オ / 12 図 油によるネオプレン層の膨満状況 (その 1)




オ / 13 図 油によるネオプレン層の膨満状況 (その 2)



ケーブル布設に当っては、上述の化学薬品の存在する場所を避け、または、他の材料の防蝕層を用うることがオーであるが、ネオプレン層の加工方法、使用温度にも留意する必要がある。

ちなみに事故を生じた前記芳香族油は

比 重	0.996	15°C
180°C 溜 分	8 %	
 分	16 %	
そ の 他	タール分、トロール	

の油であつたが、これによる25°Cにおける吸油テストはオ19表の如く一般絶縁油と逆に天然ゴムよりも劣っている。従つて特殊油の流れ込む布設地には特に注意を要する。

オ19表 ゴムの吸油試験

項 目 ゴム種類	飽 和 吸 油 量 (%)	長 さ 増 加 率 (%)	ゴムの中への拡散定数 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
ネ オ プ レ ン	305.0	7.5	$6.5 \times 10^{-4}$
天 然 ゴ ム	204.0	5.3	$2.9 \times 10^{-4}$

試験温度—25°C

#### 6.4. 熱応力挫屈

電力紙ケーブルでは、パイプ構造としての熱応力挫屈は見られないが、管路布設の長いケーブルには、熱膨脹により *snaking* または *bird-caging* が見られる。これは、鉄道レールの熱膨脹による挫屈と同じ現象で、広い意味では、熱応力挫屈と云うことができる。

ケーブルの熱膨脹による伸縮はケーブルのマンホールへの移動を伴い、接続部近辺に歪を集中させ、被覆に亀裂を生じさせるのでケーブルとしては、最も重要な研究課題の一つであるが、管路状態、入孔内くせとり状態、管路口の抗束力、ケーブルの膨脹係数、圧縮率等困難な問題が多く、現在迄殆ど解明されていない。

外国で *triplexed cable* を用いることにより、熱膨脹を *bird-caging* で逃げることを提案しているものもある。

なお、紙は一般に熱により膨脹するが、紙によつては、加熱による膨脹量の特に少いものもある。一般に叩解度の進んだものはこの傾向をもつ。

このような紙は、乾燥前に生じた挫屈皺が、乾燥により直る際に（湿気除去に伴う応力緩和による。）その効果を減じないことに僅か乍ら役立つ筈であるが、オノノ図に示す如く熱による膨脹量は湿気のそれに比して格段に小さいから、その効果は期待できない。

#### 6.5. 結 言

本章においては 電力紙ケー  
ブルにおける内部固有応力挫屈について紹介した。

紙捲における調湿は紙の捲付時のなじみをよくするほか、本章に述べた湿気応力挫屈の可逆性の利用により挫屈皺防止に対しては二重の効果がある。

また、膨潤によるもの、熱によるものを分類上の意味をも含めて説明した



## オ7章 電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造について

### 7.1. 結 言

序章に述べた如く電力紙ケーブルは長尺物構造としての円筒およびスパイラルの組合せからなる。

電力紙ケーブルでは取扱の容易（特に可撓性）という点で、被覆には鉛、アルミニウムの如き軟い金属が、また防蝕層にはネオアレン、ビニール等の如き弾性に富むものが円筒として可撓性に支障を与えず用いられている。

しかし硬い材料または伸びの少ない材料にあつては、エレメントに分割され、各々がスパイラルとして集合されるか、もしくはスパイラル状に纏巻されて他の構成と組合わされる。

これは分割することによる断面二次モーメントの減少、各スパイラル間の相互移動により取扱時における可撓性の増加を目的とするもので、そこにはスパイラル構造全体に共通した性質が見られる筈である。

本章では電力紙ケーブルに用いられるスパイラル構造の種類について概説し、またケーブルにおいて実用上必要な撚加工理論を説明して、次章以降のスパイラル構造研究に対する序章とした。

### 7.2. 電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造の種類<sup>(51)</sup>

電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造をスパイラルピッチにより分類すれば、オ1/4図の如くである。<sup>(51)</sup>

これらピッチおよびエレメント数は材料の硬さ、形状、目的用途により適用範囲が定められる。

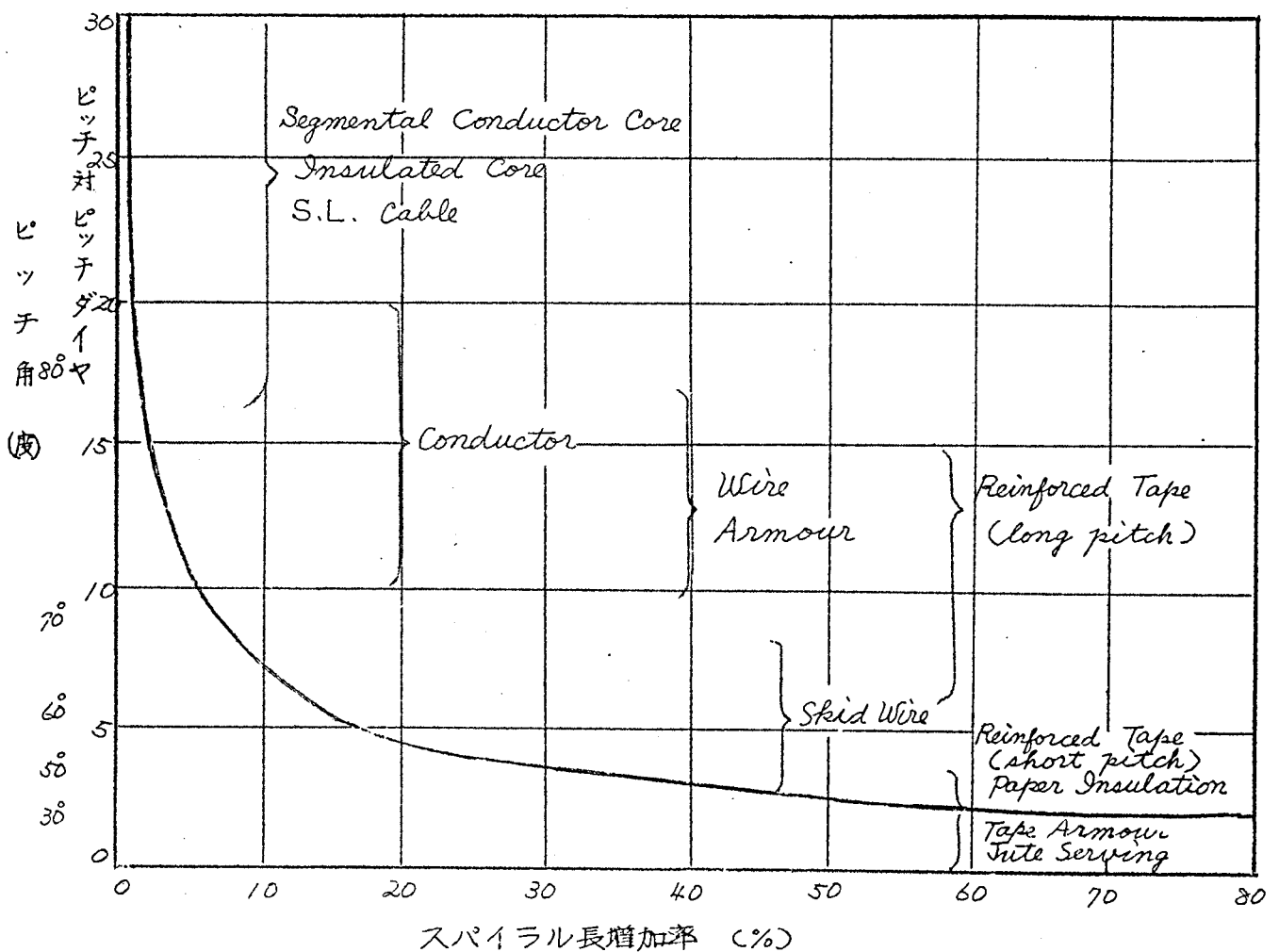
図においてピッチ角大なるものは変形による相互移動量が大きく、可撓性の不足をこれによつて補わざるをえない。

オ1/4図において、これらスパイラル構造はまた素材形状により線状のものと帯状のものに大別できる。

帯状のものは O.F ケーブル 縦方向 補強帯の如き特別のものを除き ピッチ/ピッチダイヤが 3 を越すことはない云つて良い。これらテープは本来の意味でのスパイラルであつて同一円筒面に捲かれるテープ数(素線数)は原則として 1 枚である。従つて、これらテープは外力により強度が問題とされることはあつても構造上、加工上の問題はほとんどないので以下素材が線状(丸線のほかに扇形、半円、四分割をも含む)のもの、すなわち燃合構造のものを主として考察する。

なお、ケーブルの構成材は必ずしも可撓性に富んでいないので、各構成の可撓性は全体のそれとのバランスを取つて設計すべきで無暗に可撓性をあげる必要はない。

※ 11.4 図 電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造のピッチによる分類



### 7.3. 捻り(スパイラル)加工の理論

スパイラル構造に関する研究は戦后ワイヤーロープ界で特に盛んであつて、多くの人々が手がけて来たが、捻り加工の理論ともいふべきものはほとんどまとめられていない。ここでは今迄に個々に発表せられたものも取り入れ、次章以下の考察に必要なものおよび実際のケーブル取扱いにおいてスパイラルの性質を知る上にしばしば必要となるものに関してのみ説明したい。

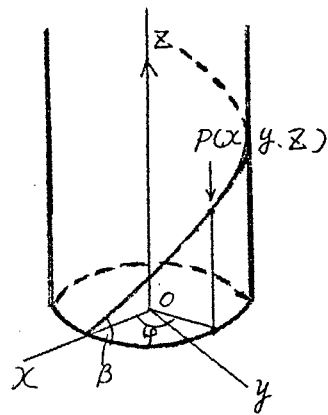
動力ケーブルでは布設時以外大きな張力がかかることはないので、張力を受けた場合は扱わない。また、個々のものは必ずしも関連性はない。

#### 7.3.1. スパイラルの曲率および捩率

素線スパイラルの曲率および捩率はケーブルコア、導体が捻合せに際して受ける歪および残留応力を考慮する場合必要となる。

オノノ5図のスパイラルにおいて任意点  $P(x, y, z)$  の底面への射影と原点  $O$  とを結ぶ直線の  $x$  軸との角度を  $\varphi$  とし  $r$  をスパイラル半径、 $\beta$  をピッチ角とする。

オノノ5図 スパイラルの座標



$$x = r \cos \varphi$$

$$y = r \sin \varphi$$

$$z = r \tan \beta \cdot \varphi$$

スパイラルの微小長さ  $ds$  は

$$ds^2 = (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2 = r^2 \sec^2 \beta d\varphi^2$$

$$\therefore \frac{d\varphi}{ds} = \frac{\cos \beta}{r}$$

切線、主法線および副法線の方向余弦をそれぞれ  $(u, v, w)$  ( $l, m, n$ ) ( $\lambda, \mu, \nu$ ) とすれば

$$u = \frac{dx}{ds} \quad l = \frac{1}{K} \frac{du}{ds} = -\frac{1}{\tau} \frac{d\lambda}{ds}$$

$$v = \frac{dy}{ds} \quad m = \frac{1}{K} \frac{dv}{ds}$$

$$w = \frac{dz}{ds} \quad n = \frac{1}{K} \frac{dw}{ds}$$

ここに  $K, \tau$  はスパイラルの曲率および捩率、

$$\frac{d\varphi}{ds} = \frac{\cos\beta}{r} \quad \text{を代入して}$$

$$u = -\cos\beta \sin\varphi$$

$$v = \cos\beta \cos\varphi$$

$$w = \sin\beta \quad \text{が得られる。}$$

$$\therefore l = \frac{-1}{K} \frac{\cos^2\beta \cos\varphi}{r}$$

$$m = \frac{-1}{K} \frac{\cos^2\beta \sin\varphi}{r}$$

$$n = 0 \quad \text{しかるに } l^2 + m^2 + n^2 = 1$$

$$\therefore K = \frac{\cos^2\beta}{r}$$

$$\text{従つて } l = -\cos\varphi$$

$$m = -\sin\varphi$$

$$n = 0$$

$$\lambda = \nu n - w m = \sin\beta \sin\varphi$$

$$\therefore \tau = -\frac{1}{l} \frac{d\lambda}{ds} = \frac{\sin\beta \cos\beta}{r}$$

すなわち、曲率  $\frac{\cos^2\beta}{r}$  捩率  $\frac{\sin\beta \cos\beta}{r}$  である。

### 7.3.2 スパイラル加工における換れ角

スパイラル加工における換れ角は、前項と同じくコアーおよび導体の受ける歪、残留応力等を考慮する時必要である。

スパイラル工程ではいわゆる「クランク返し」を用いて燃返しを行う場合が多い。

この場合の素線の垂直断面の相対的回転角  $\frac{d\theta}{ds} ds$  は、前記換率に應ずる相対的回転角  $\tau ds$  と燃返し加工による回転角との和によつて与えられる。

燃返し加工によるものは

$$\begin{aligned}\frac{d\theta'}{ds} \cdot ds &= \frac{\omega_2 dt}{ds} \cdot ds = \frac{\omega_2 \cos\beta}{\omega_1 r} ds \\ &= a \frac{\cos\beta}{r} ds\end{aligned}$$

で与えられる。

ここに  $\omega_1$  : スパイラル捲付(燃加工)の回転角速度

$\omega_2$  : ボビン(またはドラム)支持腕の回転角速度

$$a : \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

従つて

$$\begin{aligned}\frac{d\theta}{ds} &= \tau + a \frac{\cos\beta}{r} \\ &= \frac{\sin\beta \cos\beta}{r} \left( 1 + \frac{a}{\sin\beta} \right)\end{aligned}$$

燃合加工時におけるノピツチ当りの換れ角は

$$\begin{aligned}\int_0^{2\pi r \sec\beta} \frac{d\theta}{ds} ds &= \frac{\sin\beta \cos\beta}{r} \left( 1 + \frac{a}{\sin\beta} \right) 2\pi r \sec\beta \\ &= 2\pi \{ \sin\beta + a \}\end{aligned}$$

従って捻返しのない時は  $\alpha = 0$  となり、1ピッチに

$$2\pi \sin \beta$$

だけ捻方向に換れる。

また、最も簡単な1回転に1回の捻返し、すなわち所謂ハラセの捻返しの場合は  $\alpha = -1$  となり、

$$-2\pi (1 - \sin \beta)$$

すなわち反対方向に  $2\pi (1 - \sin \beta)$  だけ換れる。

われわれの取扱う範囲のピッチ角では

$$2\pi (1 - \sin \beta) < 2\pi \sin \beta$$

であるから、このハラセの捻返しを行うことにより、換れの方角を反対とし、かつ、換れ角を減じ、これにより捻合後の戻ろうとするモーメントを少なくすることができる。特にケーブルコアーの場合は捻返しを用い、換れによる紙皺の発生を防ぎうる。

ベルトケーブルの如く非円形のものは、捻合時の捻返しを行うためには前工程において所謂予捻り (*Preform*) をすることが必要である。

### 7.3.3 多層捻りにおける直線状態の限界ピッチ<sup>(52)</sup>

多層捻りにおいてピッチが小さすぎる場合は心線と側線が接触する前に側線間で接触して変形を起したり、側線の一部が浮き上つたりする。

たとえばケーブル導体ではこれにより絶縁紙を傷つけたりする危険がある。以下このような多層捻りにおける限界ピッチを算出するがここでは素線の材料力学的変形を考慮しないで幾何学的形状のみを扱う。

近似式としては縦断面または横断面において素線形状が楕円形であるとして求める。横断面の場合は、オノノ図において中心素線の中心から側線楕円断面へ引いた切線の方程式を求め、隣接二切線のつくる角度を  $\frac{2\pi}{n}$  と置くことより容易に

$$P_c = \frac{\pi D}{\sqrt{\left\{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1\right\} \tan^2 \frac{\pi}{n} - 1}}$$

が求まる。

ここに

$P_c$  ----- 限界ピッチ

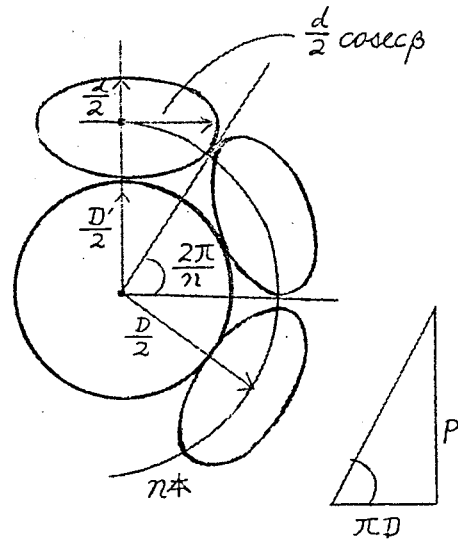
$n$  ----- 側素線数

$d$  ----- 側素線直径

$D'$  ----- 中心線直径

$D$  ----- ピッチダイヤ ( $= D' + d$ )

オ 116 図 捻線の横断面



限界ピッチ角を  $\beta_c$  とすれば

$$\beta_c = \sin^{-1} \left\{ \frac{\cot \frac{\pi}{n}}{\sqrt{\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1}} \right\} \text{ となる。}$$

(今迄発表されたものは arcsine の形をとっているものが多いので、比較のためこれによつた。以下これに倣う。)

縦断面の場合はさらに簡単でオ 117

オ 117 図 捻線の縦断面

図より

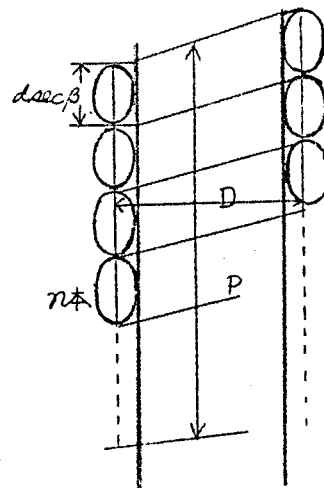
$$P_c = \frac{\pi D}{\sqrt{\left(\frac{\pi D}{n d}\right)^2 - 1}}$$

または

$$\beta_c = \sin^{-1} \left( \frac{n}{\pi} \cdot \frac{d}{D} \right)$$

いずれも楕円断面を仮定しており眞の誤差

をもつ。

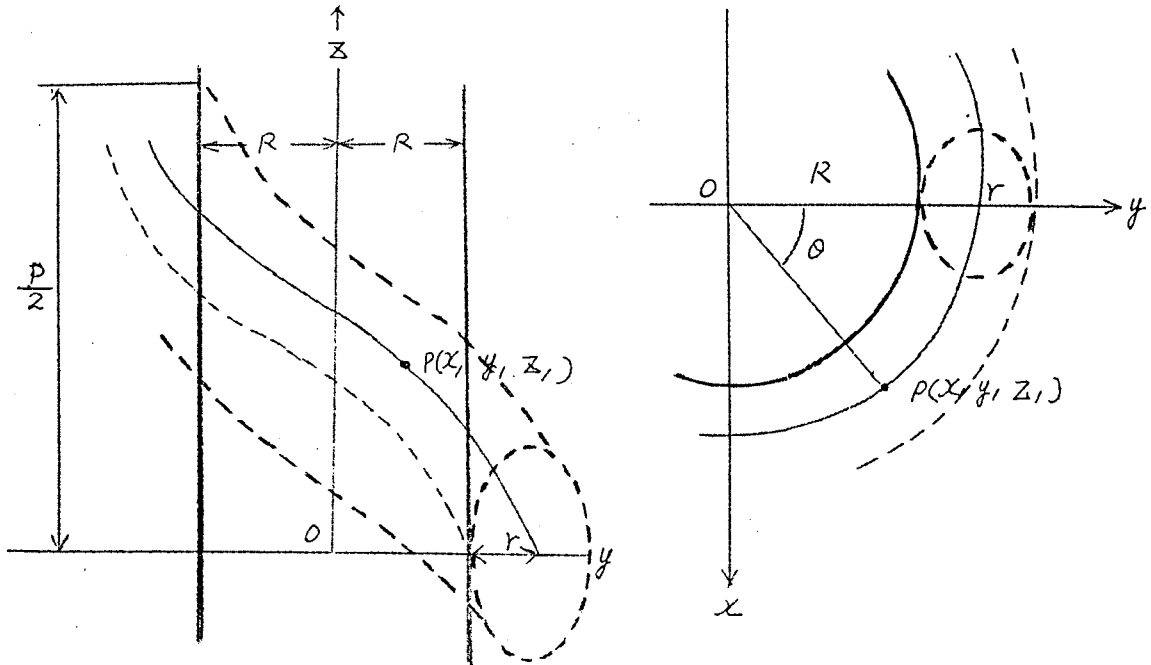


また一般にわれわれの扱う範囲の多層捻りでは横断面のものの方が誤差が少いが、縦断面のものでも素線径に比しピッチダイヤ  $D$  の大きなも

のでは実用上誤差は少い。

なお厳密なものとしては今井氏が次の如くに求めている。(52)

オノノ 8 図 スパイラル素線の座標



オノノ 8 図において半径  $R$  の円筒上に  $r$  なる丸素線がピッチ  $P$  で巻かれている状態を考える。 $P$  の座標は

$$x_1 = (R + r) \sin \theta$$

$$y_1 = (R + r) \cos \theta$$

$$z = \frac{P}{2\pi} \theta$$

従つて  $P$  を通り素線軸に直角な平面で切つた素線切口の軌跡は、つぎの二式の交線として与えられる。

$$\{x - (R + r) \sin \theta\}^2 + \{y - (R + r) \cos \theta\}^2 + \left(z - \frac{P}{2\pi} \theta\right)^2 = r^2$$

$$(R + r) \cos \theta \times x - (R + r) \sin \theta \times y + \frac{P}{2\pi} z = \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 z$$

前者は  $P$  を中心とした半径  $r$  なる球面、後者は、素線軸に直角なる平面を表わす。従つて  $\theta$  を変数と考えればこれら二式の交線の軌跡はスパイラル状素線の表面を表わすことになる。



γ 面での切口は上記二式において  $\chi = 0$  とし

$$z = \frac{B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} + \frac{P}{2\pi} \theta$$

$$\text{ここに } A = \frac{P^2 + 4\pi^2(R+\gamma)^2 \sin \theta}{4\pi^2(R+\gamma)^2 \sin^2 \theta} \quad B = \frac{P \cos \theta}{\pi \sin \theta}$$

$$C = (R+\gamma)^2 - \gamma^2$$

で与えられることとなる。

従つて限界ピッチ  $P_c = n \times 2z_{\max}$   $n$ : 素線数

ここに於いて

$$\frac{R}{\gamma} = m, \quad \gamma = 1, \quad P_c/D = \chi, \quad D = 2(R+\gamma)$$

とすると

$$\left[ \frac{2\pi \sin \theta \{ \chi(m+1) \cos \theta + \sqrt{\chi^2 - \sin^2 \theta \{ \chi^2(m+1)^2 + \pi^2(m^2 + 2m) \}} \}}{\chi^2 + \pi^2 \sin^2 \theta} + \frac{2\chi(m+1)}{\pi} \theta \right]_{\max}$$

$$= \frac{2\chi(m+1)}{n}$$

を満足する  $\chi$  が  $\frac{P_c}{D}$  を表わすことになる。従つて数値計算により限界ピッチを求めることができる。

#### 7.3.4. 多層撚りを曲げた場合の限界ピッチ

この場合は完全な解析は困難であるので、ここでは前項の縦断面において素線形状が楕円形であるとして行う近似方法による。

オ 119 図において曲率半径  $\rho$  に曲げられる前の限界ピッチを  $P_c$  とし、 $\rho$  に曲げられた場合内側素線が接触するものとする。

その時のピッチ  $P_{bc}$  は

$$P_{bc} = P_c \left( 1 + \frac{D}{2\rho} \sin \varphi \right)$$

$P_{bc}$ は、 $\psi = \frac{3}{2}\pi$ の時

オ//9図 曲げを受ける捻線の縦断面

最小値をとる。すなわ

ち

$$P_{bcmin} = P_c \left(1 - \frac{D}{2\rho}\right)$$

このピッチ内に  $n$  本の素線  
が並ぶ訳であるが、素線形  
状の変化は素線移動現象と  
関連し、実験的にも決定困  
難である。今迂行われてい  
るものは、曲げた後のピッ  
チ角が一定または曲げに比  
例して変ることを仮定して

算出している。すなわちピッチ角不変の場合は

$$P_{bc} = P_c \left(1 - \frac{D}{2\rho}\right) = nd \frac{\sqrt{(\pi D)^2 + P_c^2}}{\pi D}$$

$$\therefore P_c = \frac{\pi D}{\sqrt{\left(\frac{\pi D}{nd}\right)^2 \left(1 - \frac{D}{2\rho}\right)^2 - 1}}$$

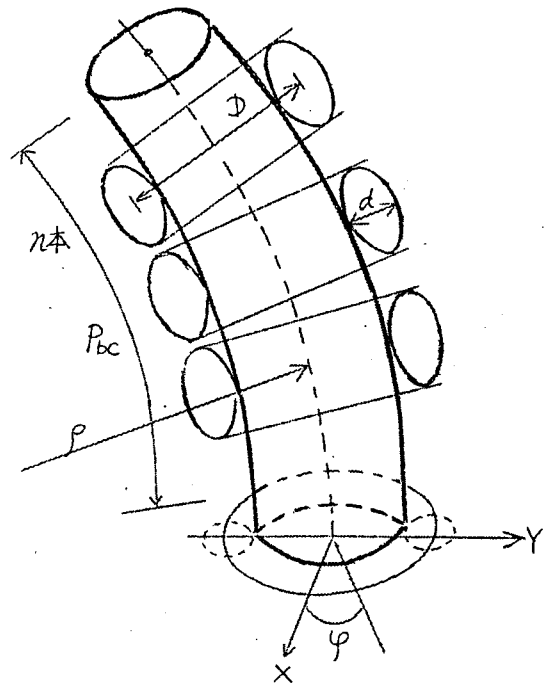
$$\beta_c = \sin^{-1} \left( \frac{\frac{nd}{\pi D}}{1 - \frac{D}{2\rho}} \right)$$

ピッチ角の変る場合は

$$P_{bc} = P_c \left(1 - \frac{D}{2\rho}\right) = nd \frac{\sqrt{(\pi D)^2 + P_{bc}^2}}{\pi D}$$

$$\therefore P_c = \frac{\pi D}{\left(1 - \frac{D}{2\rho}\right) \sqrt{\left(\frac{\pi D}{nd}\right)^2 - 1}}$$

$$\beta_c = \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{D}{2\rho}\right)^2 \left\{ \left(\frac{\pi D}{nd}\right)^2 - 1 \right\} + 1}}$$

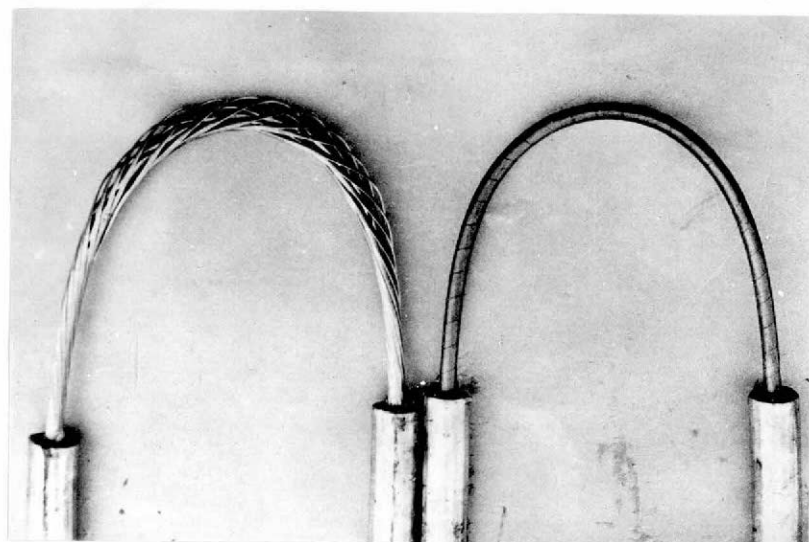


上記両式で計算すると大きな違いがあるが、いずれも仮定を重ねており、実際との関連は未だ解明されていない。

また素線形状変化を決定する素線移動現象(オ/1章参照)は、単一な多層撚りの場合と外部をテープ類で押えた場合とでは、押えないものは浮上るため大きく変る。参考迄に裸撚線および紙を1枚捲いた場合の曲げの様相の一例をオ/20図に示す。

図は比較のため特に極端に曲げた  $100\text{ mm}^2$  セグメンタル導体が、僅か1枚の紙で導体の浮上りを押えている状態を示す。

オ/20図 曲げを受けた撚線の抑えテープの有無による比較



本項および前項には、幾何学的な限界ピッチについて述べたが、電力ケーブルの場合は、ワイヤーロープ等と異なり撚合構成は変形を受けやすい。たとえばケーブル構成材の中ではもつとも変形をうけにくい導体の場合も材質は軟銅であつて、場合によつては限界ピッチを越して支障なく撚られている。オ/21図は  $150\text{ mm}^2$  同心撚線 ( $3\frac{3}{4} \times 2.3\text{ mm } 16.1/\text{mm} \phi$ ) のキャプスタン捲取前の曲げを受けない部分を半田で固めた后切断して、断面を拡大鏡にて撮影したものであるが、線材は相当な変形をうけて面

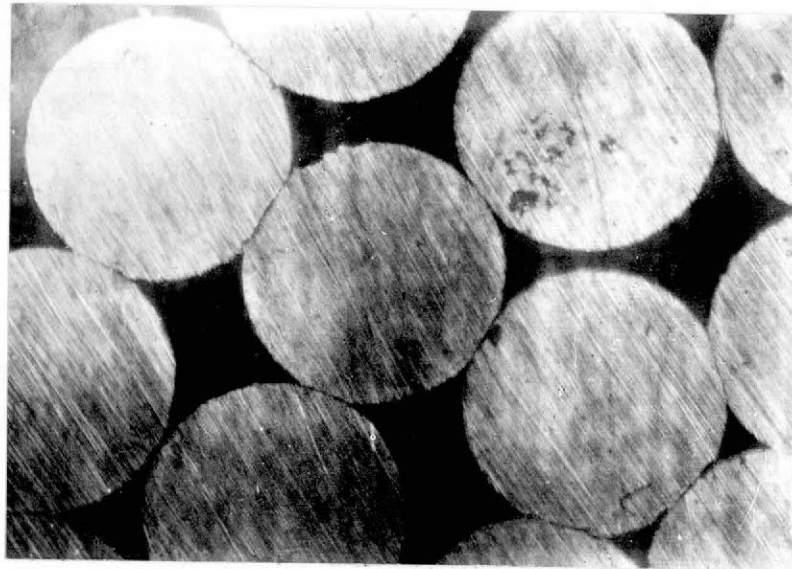
接触をなしている様がよく分る。

(中心線も同径であるので、当然オノ層6本は限界ピッチを越している)

従って従来論じられている直線時の限界ピッチあるいは曲げ時の限界ピッチといったものは単なる幾何学的な数値であつて、材料の変形、線材の外径公差を考えれば実際的な意味は比較的少い。

しかし、導体において捻線径または、素線径が大となる時に外部絶縁層へ及ぼす影響等を検討する場合には、比較の意味での一つのメジャーにはなると思う。

オノ2/図 捻線断面の素線接触状況



#### 7.3.5 多心捻合せと限界ピッチについて

× / 5

スパイラル加工をすることを場合によつて捻る、巻きつける、ねぢる、捻合す等色々の云い方で呼んでいるが、その関係は、はつきりしないまま使用されているので、限界ピッチとの関連においてその間の状況を明らかにしたい。

オノ22図はピッチ/ピッチダイヤとピッチダイヤを縦軸、横軸にとり、各素線数ごとに限界ピッチ曲線を示したものである。従って限界ピッチ曲

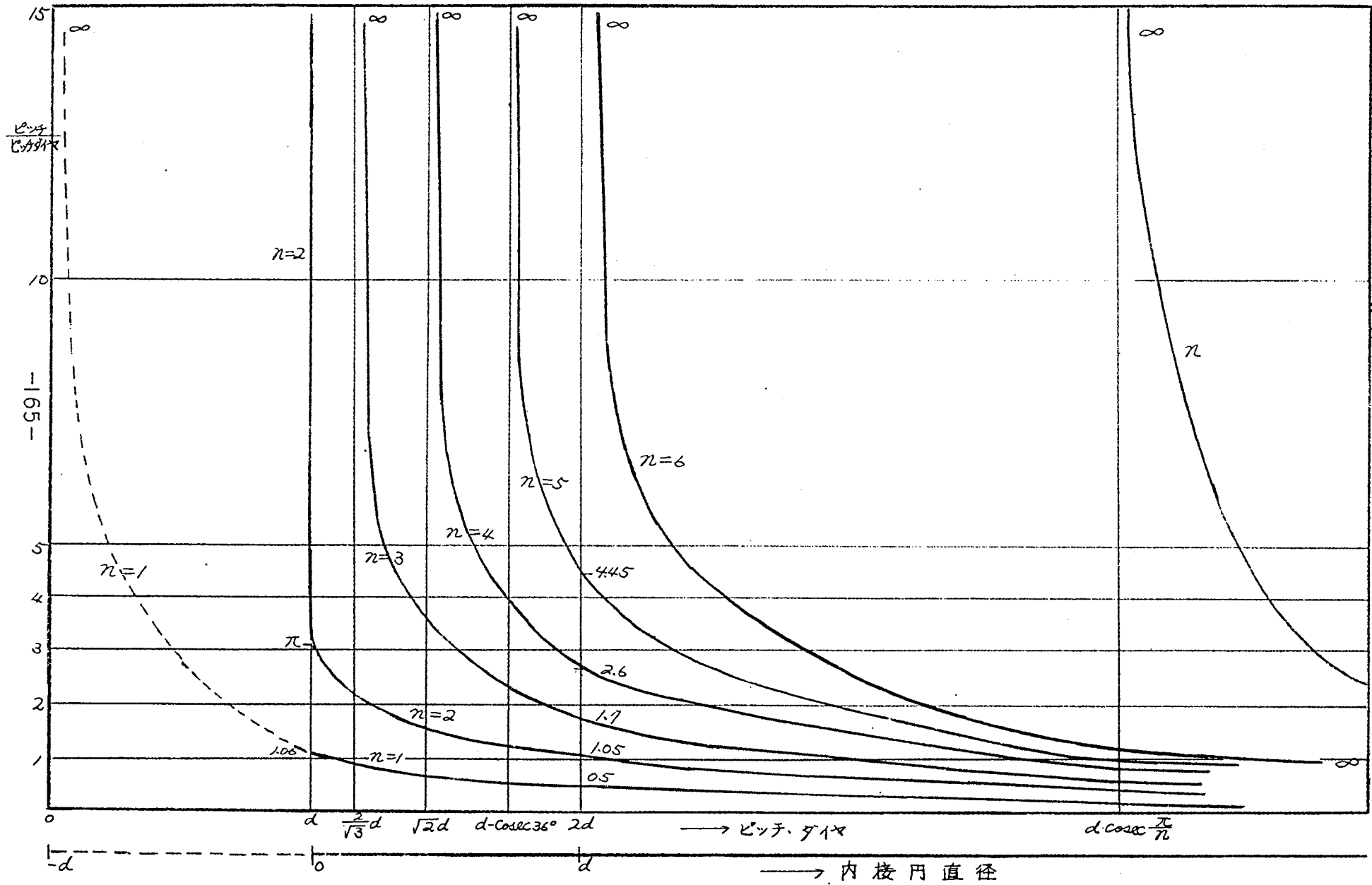
線より下の領域は燃り加工不能の範囲である。周隙なく均整に燃合せる場合はピッチが大になるとともにピッチダイヤ（従って、外径または内接円径）は小になる。

図により、われわれがいわゆる燃合せ（2心または4心合）と称するものも多層燃線の場合と本質的な違いはないが、燃合せとは内部心のない状態で比較的ピッチの大きいもの（内接円直径の小さいもの）を指して云っていることが分る。内接円直径の大きいいわゆる、捲かれるという状態との間に判然とした境界はない。

なお、2心燃合、3心（または4心）燃合せは内部心のない状態であるので安定な状態をとるために常に限界ピッチで燃られることとなる。

また、2心燃合せは図の如く特異な曲線を示し、 $P/d \geq \pi$  では常に2心は中心線に線で接する。1心の場合はピッチ、ダイヤが素線直径以下の部分が存在し、これは線がうねる（ねぢられる）状態を示す。（図点線部分）。図における数値は前記の今井氏の厳密なる解によるものであるが、他の部分の曲線位置は傾向を見るためのもので正確ではない。

オ/22 図 多心捻合せと限界ピッチの関係



#### 7.4 結 言

本章は電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造の種類およびスパイラル加工の理論につき記述した。

すなわち、撚線における素線挟り角の誘導、限界ピッチの計算、それと実際の意義との関係につき説明し、また、撚る、捲きつけるといった用語の意味を限界ピッチとの関連において明確にした。

これらにより次章以下のスパイラル構造研究に対する序章をも兼ねた。

## 第8章 燃線スパイラルの特性について

### 8.1 まえがき

電力ケーブル導体としてカーに要求されるものは当然その導電性の良いことであるが、長尺物として取扱いやすいこと、上部絶縁層を傷めぬこと等の機械的性質もまた、大切な特性である。

過去に絶縁層の機械的特性の研究が、あまり発表されていない状態であつたと同様に、導体の機械的性質もこれにふれたものは非常に多いが、ほとんど見るべきものはない。これは電力紙ケーブルが架空線、ワイヤーロープと異なり静置して使用されるので、その導体の特性が問題となるのは主として布設に至る迄に限られるためである。従つて、たとえば最も大切な導体の可撓性の如きも明確なる比較の尺度もなく、単なる感覚的な比較が行われたのみであり、導体が、ケーブルの中で占める可撓性の割合と云つたものも<sup>あまり</sup>判然としていなかった。導体を構成する素線至も何十種にも及び、極端な細い線を燃つたものから丸導体のまゝ使用されるものもある。

それ故導体の機械的性質を明かにすることにより、より合理的な燃線構成ないしは新しい導体種類（圧縮導体、セグメンタル素線燃り導体等）の発展を見ることが出来る。

### 8.2 燃線の曲げ特性について (53)(54)(55)

#### 8.2.1 緒言

燃線の可撓性は燃線の機械的性質の中の最も重要なもので、可撓性をあらはす尺度（定義）およびその測定法について多くの人が種々提議している。

可撓性を表わすには燃線を弾性域および塑性域の各曲率 $\rho$ における曲げに要するモーメント $M$ を曲線で表わすことが最も妥当であると思う。

しかしこれは可撓性を一意に表わし得ず、また、ある曲率にまげる実験



は特別範囲以外は困難であるという不便があるので、実際には特定の曲率におけるモーメントまたは残留変位で表わしたり、曲げ剛さ ( $B = EI$ ) または曲げ剛さに関連した量によつて表わすことが多い。

これらを一覧すればつぎの如くである。

1.  $M - \frac{1}{r}$  特性で表わすもの。
2. 曲げ剛さ ( $B = EI$ ) の値そのものによるもの。
3. その撓線の  $EI$  と同一外径の丸棒の  $EI$  との比によるもの。

$$F_d = \frac{EI}{E_o I_d}$$

4. その撓線の  $EI$  と同一断面積の丸棒の  $EI$  との比によるもの。

$$F_s = \frac{EI}{E_o I_s}$$

5. 一定角度 (または曲率) に曲げるに要する仕事量、荷重等で表わすもの。

6. 残留変位によるもの。

ケーブル導体の場合は、ケーブル全体とのバランスを取つて可撓性を送ふべきであるので、外部のケーブル構成と比較しやすいことを考慮して、筆者は上記2の曲げ剛さ ( $EI$ ) の値そのものによるものが最も好都合であると考え提議して来たが、これは現在電力ケーブル界において一般に採用されるようになった。

### 8.2.2 撓線の可撓性測定方法<sup>(55)</sup>

筆者は過去にケーブル導体について発表された各種の可撓性測定法を一通り、検討して見たので、まづこれらについて簡単に述べる。

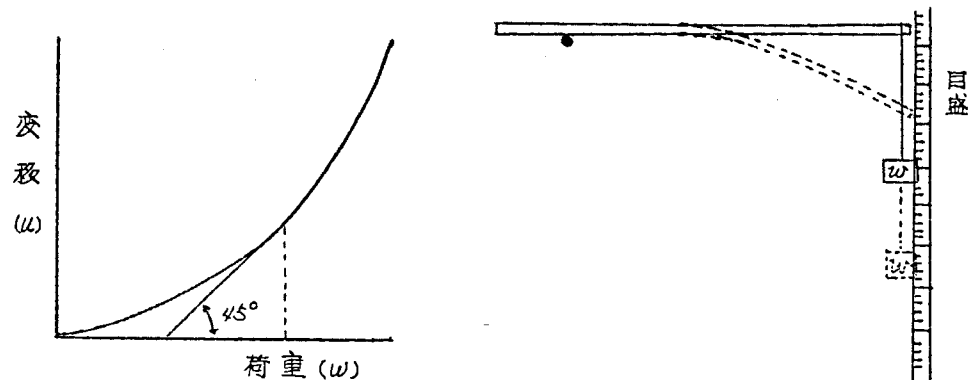
#### 8.2.2.1 片持梁において塑性変形への変移点の荷重により表わす方法<sup>(56)</sup>

一端を固定した梁を塑性変形する迄曲げ、弾性変形から塑性変形に移る点の変形に相当する荷重を柔軟係数とする。

単線の柔軟性を表わす目的で始められたもので、特定の単位を目盛

りとした荷重-変位曲線における  $\frac{du}{dw} = 1$  の時の荷重の値で表わしている。(オ123図) しかし  $\frac{du}{dw} = 1$  なる点も単位の取り方により一定しがたく理論的にもあいまいであり、特に燃線の場合は塑性変形への変移点も判然としない。

オ123図 片持梁による柔軟性測定方法

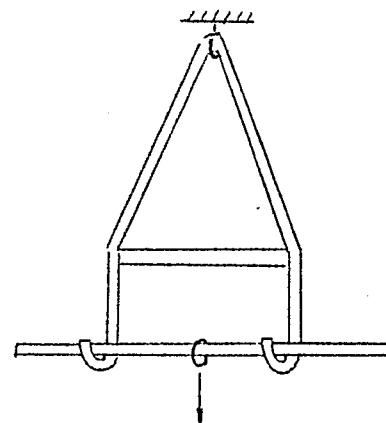


#### 8.2.2.2 両持梁において中央集中荷重を加えた時の最大応力値によるもの (55)

われわれの実験はオ124図の如き方法で行った。荷重を加えた点のある変位において応力は最大値を示すからこれを測定した。

この方法においては両端の支持法に問題があり(支持間の試料長さが変わる)

オ124図 中央集中荷重の最大応力値による可撓性測定法

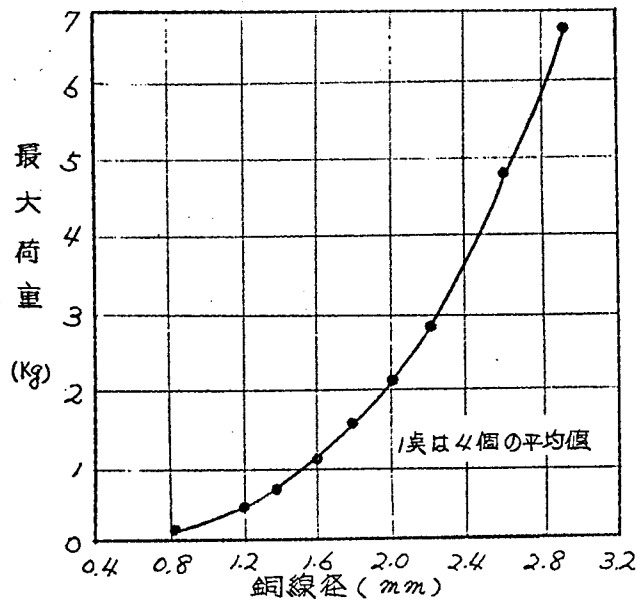


EI との関係を理論づけることが困難である。測定に要する時間が少くバラツキが少い利点があり、燃線の場合も細物では利用できる。

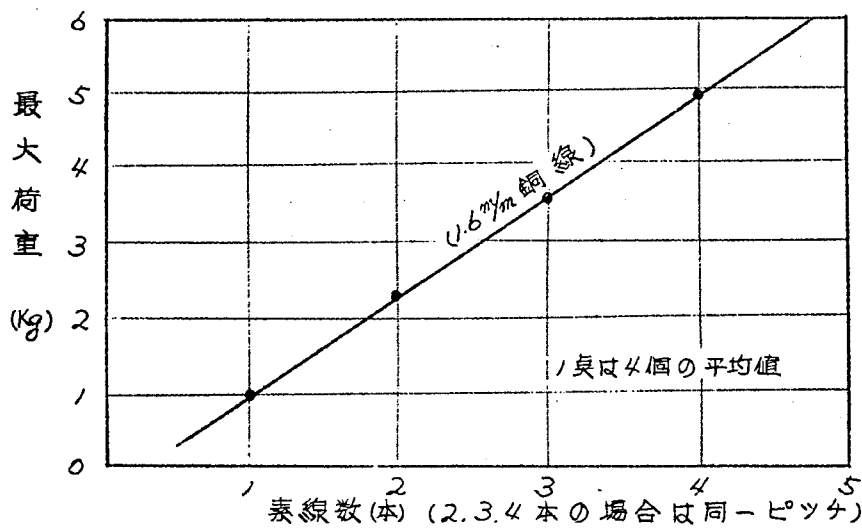
測定の一例をオ125図、オ126図に示す。

カ125図 単線の測定例

線径の異なるもの

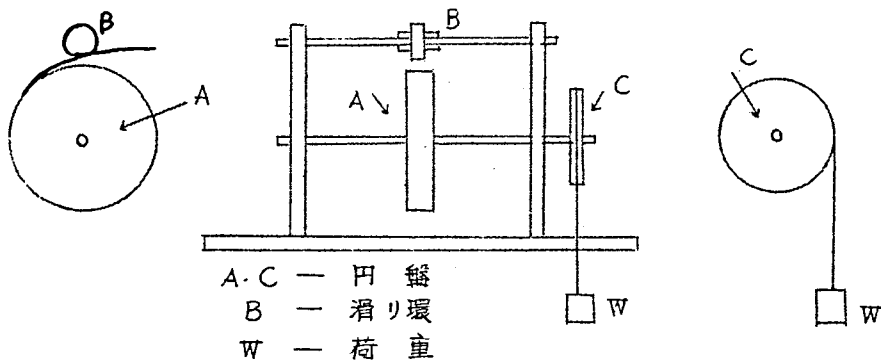


カ126図 撚線の測定例



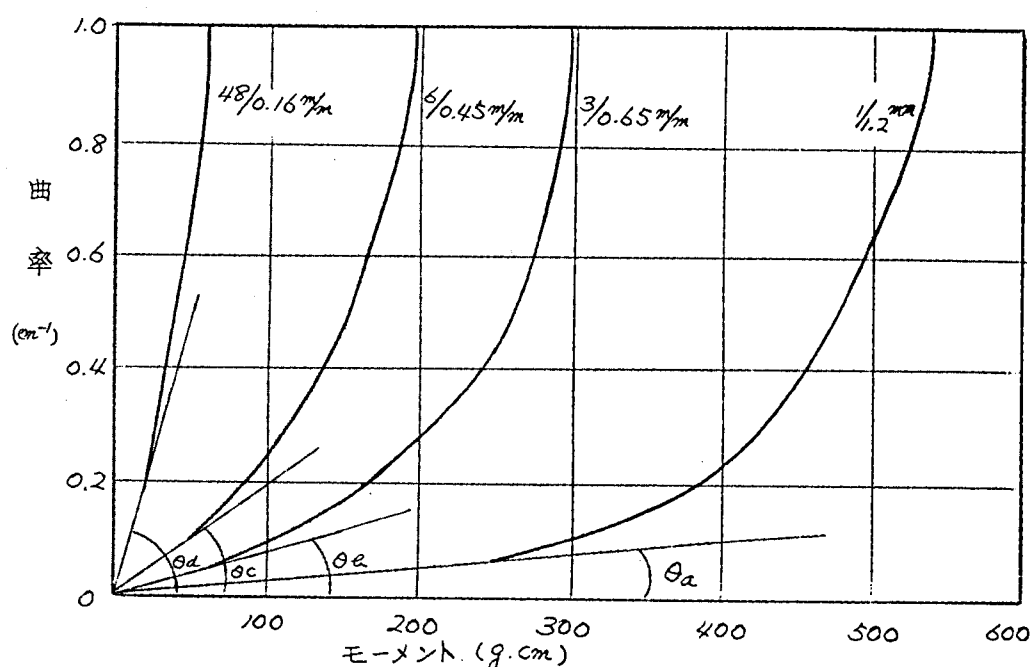
### 8.2.2.3 線を巻付ける円盤が始動する際の回転モーメントによる方法

カ127図 円盤の始動回転モーメントによる可撓性測定法



図の如き測定器を用い円板Aの周りの一点に測定しようとする燃線  
 線的一端を接着させ、試料の他端は試料と支持物との摩擦を最小にする  
 ため、滑り環Bを持つ支持棒にて支持し円板Cに回転モーメント  
 を加え、円板<sup>A</sup>が始動する時の燃線が弯曲するに必要な回転モーメント  
 Mを測定する。円板の半径を種々変化した場合回転モーメントMと  
 曲げの曲率  $1/\rho$  との関係はFig. 28の如くなる。

Fig. 28 円盤始動モーメントによる可撓性測定例



直線では曲率の小さい間は  $EI$  が一定で直線的変形をする。すな  
 わち弾性変形をするが曲率がある値以上になるとMはほとんど増加  
 しないで円盤は始動する。燃線の場合は  $M - 1/\rho$  曲線は極めて徐々  
 に弯曲する。この曲線の各点における切線とモーメント軸とのなす  
 角の正切をもつて、その曲率における柔軟性を表わす尺度とするものであ  
 る。(57)

原点における切線との正切は

となる。 
$$\tan \theta = \frac{f}{M} = \frac{1}{EI}$$

この測定においては試料のない時の回転モーメント、試料の長さ

支持点Bの高さ、支持点との摩擦について考慮する必要がある。

$1/EI$  の値を求めるためには少くともニヶ以上の円盤で測定する必要がある。また、太物の場合相当大きい円盤の準備が必要で大きな設備が要るが、細物の場合には有力な測定法である。しかし単位のとおり、異なる線との比較の点では理論上難点がある。筆者はむしろこの方法ではモーメントの値そのもので示した方がよいと考える。

なお、実験によれば

1. 撚線の一定曲率における柔軟性は撚素線数のある乗数に比例して減じ、その乗数は曲率により異なる。
2. 単線の一定曲率における柔軟性は線外径の3乗に比例して減ずる。
3. 撚線の柔軟性はピッチの短い程低下している。
4. 一定断面積の撚線は素線数の  $2/3$  乗に比例するまた素線径の  $3/2$  乗に比例する。

#### 8.2.2.4 縦振動による $EI$ 測定法<sup>(5P)</sup>

上端を固定した撚線を垂直平面内で振動させる時 *rotary inertia, Centrifugal force* 等を無視する場合、周期  $T$  は大和田氏によれば<sup>(58)</sup>

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g} \frac{\alpha}{12.67 - 0.139\alpha + 0.301\alpha^2}}$$

$$\text{こゝに、} \alpha = \frac{W\ell^3}{EI}$$

$W$  = 重量

$\ell$  = 撚線長

$\alpha < 3$  なる時は  $T = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g} \frac{\alpha}{12.67}}$  として *error* が 10% を越すことはない。

$$EI = 3.18 \times 10^{-3} W \frac{\ell^4}{T^2}$$

従つて、*damped free oscillation* により得られる周期を  $T$  とすれば、

$$\frac{1}{T^2} = \frac{1}{T_0^2} \left( 1 + \frac{\varepsilon^2}{4\pi^2} \right)$$

ここに  $\varepsilon$ : logarithmic decrement

$$EI = 3.18 \times 10^{-3} W L^4 \frac{1}{T^2} \left( 1 + \frac{\varepsilon^2}{4\pi^2} \right)$$

これにより  $EI$  が求まる。

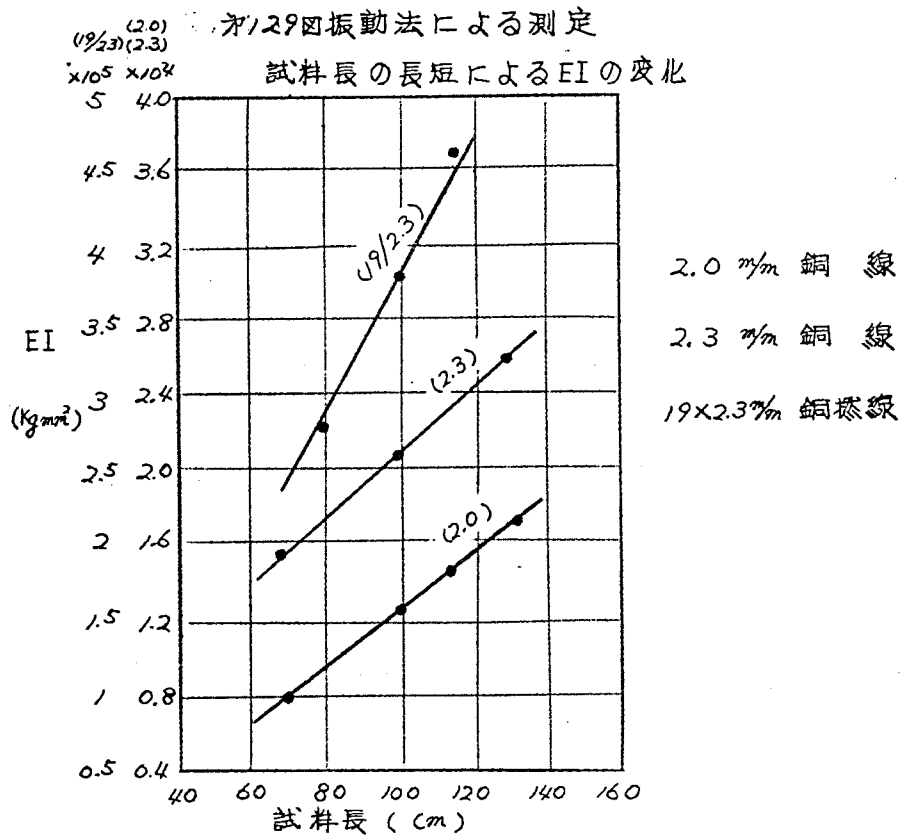
われわれの実験では細物を主に測定したので、 $\varepsilon^2/4\pi^2$  は 0.01 以下となるから  $T \div T_0$  として算出した。

表 20 縦振動による  $EI$  測定結果

測定条件		線 種		
		$EI$ (Kg·mm <sup>2</sup> )		
		2.0 mm	2.3 mm	19/2.3 mm
最初の振巾 × 1/2 (m)	3	13650	23000	
	6	13400	21950	
	9	13660	22500	
	12	13400	23000	
	20			840000
	40			818000
	60			861000
試 料 長 (m)		1	1	2

表 20、図 129 に示す如く測定値は最初の振巾によつては変らぬが試料の長さ按比例して大いに変化する。大和田氏の試験では鉄線の場合（外径 1～2 mm 程度の撚線）につき同様なことが発表されている。(58)

われわれの実験およびこれらの報告から考えて *pendulum damped free oscillation* による方法は長さの函数となるので実用には供し難いと思う。



#### 8.2.2.5 円環法に依る EI の測定法<sup>(60)</sup>

Allen King 氏の円環法は動的なもので有るがこの方法における関係式で静的な場合は

$$u = \frac{Fr^3}{EI} \left( \frac{2}{\pi} - \frac{\pi}{4} \right) \text{ が得られる。}^{(59)(60)}$$

ここに  $u$ :  $\theta = \pi$  にお

ける  $N$  点の

変位 ( $\phi 130$

図参照)

$F$ :  $N$  において

加えた力

$r$ : 円環の半径

$EI$ : 線の曲げの

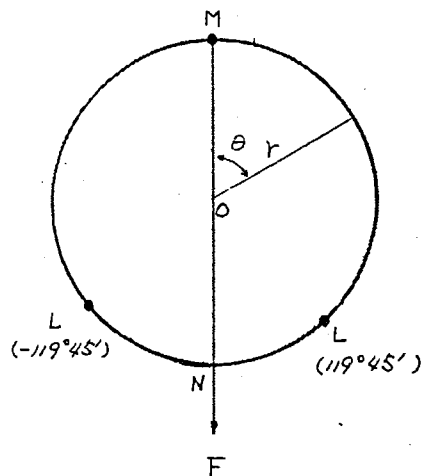
剛性率

これより  $EI$  が求められる。

これを撚線の  $EI$  の測定に利用

すれば撚きぐせにわずらわされ

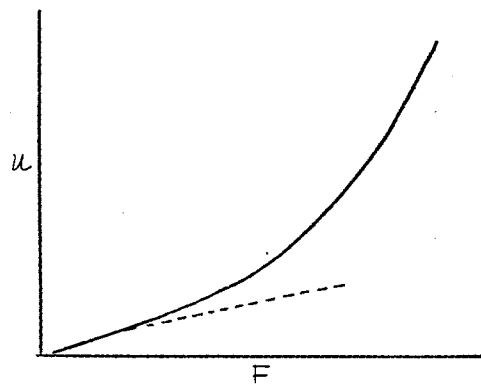
$\phi 130$  図 円環法による測定法



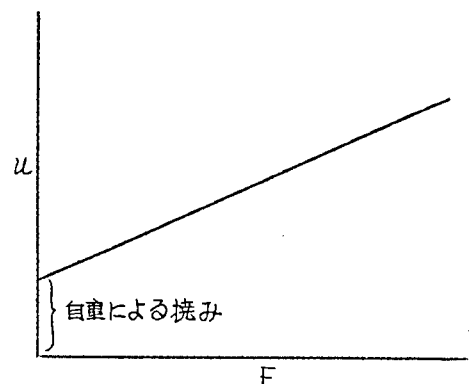
ることなく測定できる便があり、平野氏の報告においては ACSR  
について、高橋氏のものには被鉛紙ケーブルについての測定例がある  
(60)(61)

筆者の行った実験では銅単線の場合は  $\phi 131$  図の如き特性を示す  
ので、原点に於ける切線の傾きから EI を算出したが、真円度等の不完  
全のため測定値も  $\phi 21$  表の如き信頼度の低いものしか得られな  
かった。

$\phi 131$  図 単線の場合の特性



$\phi 132$  図 撚線の場合の特性



$\phi 21$  表 円環法による単線の EI 測定例

測定条件 線 径 (mm)		EI ( kg - mm <sup>2</sup> )	
		2.3	2.6
円 環 半 径 (cm)	75	10450	13950
	85	15250	30500
	95	21300	28350
	105	19150	28700
	115	15100	25020
梁の撓みによるもの		17600	—

銅撚線の場合は最も一般的な  $150 \text{ mm}^2$  について行ったが  $\phi 132$   
図の如き特性を示し、自重により L 点の位置 (Radial 方向の変位  
0 の点) が始めから相当ずれるので Allen King 氏の関係式は適  
用できない。また、この関係式を適用できると考えられる程大きい



曲率に曲げることは難しい。従って銅撚線およびケーブルの場合は  
 今迄発表例もあるが特別に細いもの以外は円環法を用いることは困  
 難であり、信頼性も少いと思う。

F-11 曲線から一応 EI を算出したので参考値として掲げる。

表 22 円環法による撚線の EI 測定値

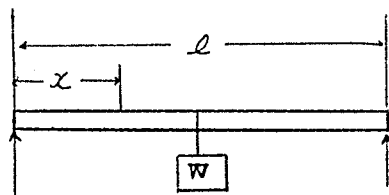
線 種	測定法	EI ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ )	
		円 環 法	浜の撓みによるもの
37/2.3 mm		760,000	635,000
" 7% 圧縮		820,000	—
" 10% "		810,000	—
7/2.6 mm } 30/2.3 mm }	10% "	1,200,000	629,500

#### 8.2.2.6 浜の荷重—撓み曲線による曲げ剛さ (EI) 測定法<sup>(54)</sup>

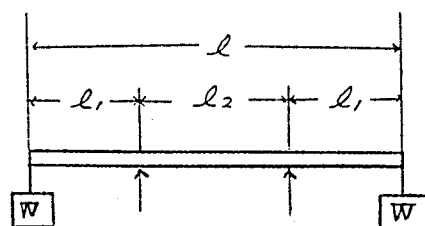
ケーブルの場合は曲げ剛性そのものを可撓性の尺度とするのが最も好都合である。これはケーブル導体の可撓性は架空線、鋼索と異なり、常に外部のケーブル構成部分との比較において論ずべきであるので、その便を考慮したためである。この測定法として筆者は比較的簡便で、かつ、信頼度も高い 荷重—撓み曲線による方法を推す。外国文献には最近でもケーブル導体の可撓性を論じたものを散見するが、このような単純な実際的な方法が案外行われていないのでこれにつき略述したい。

なお、筆者はこの方法をとるべきことを 提議して来たが、  
 現在国内電力ケーブル界では一般にこれが採用されるようになり、  
 これにより可撓性測定方法は一応定められたと云ってよい。

※ 133 図 梁の撓みによる EI 測定方法



(a)



(b)

※ 133 図に示す如く (a) (b) 二方法による測定が一般的である。

(a) による場合、曲げモーメントは、

$$M = -\frac{Wx}{2}$$

となり、曲げモーメントは支点からの距離に比例して変化し、従って曲率も支点からの距離により変化する。

(b) による場合、支点間の曲げモーメントは

$$M = Wl_1$$

となり、支点間では曲げモーメントおよび曲率が一定となる。(田丸)

(a) (b) 両方法を比較した場合、曲げモーメント一定、曲率一定の (b) 方法の方が得られる知識が多く好都合である。筆者は撓線の自重による曲げモーメントの最大値を一定にする支点距離 ( $l_2 = 0.586l$ ) に近い  $l_2 = \frac{5}{9}l$  に送り測定した。

動力ケーブル用心線の如く比較的曲げ難くかつ、その割には重量の小さなものは、自重によるモーメントの影響はごく少いが、曲げやすく自重の大きなものは、その影響を考慮せねばならない。

たとえば筆者の実験において、 $150\text{ mm}^2$  銅撓線の場合最低荷重  $100\text{ g}$  を掛けた場合のモーメントは  $800\text{ g-cm}$  であり、自重によるモーメントは約  $400\text{ g-cm}$  で、荷重を増加すれば此の影響は極く少くなる。

上記により (b) 方法を採用したが、太くて曲げ難いものは試料長も長くなるので、その場合は (a) 方法の採用が必要である。

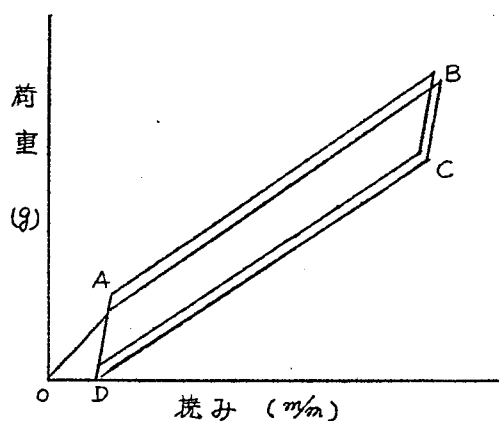
測定方法は荷重を増加して行く場合の撓みの増加と荷重を減少する場合の撓みの減少を数回繰返す。これを荷重－撓み曲線に表わした場合、通常ヒステリシスループを画く。この場合ループは平行四辺形状になるので、このうち荷重－撓みの比例する部分のみを採り計算する。

すなわちカ134図において、Oより始まりA B C Dを数回繰返す。この場合の荷重Wの増加ごとの撓みδの変化よりEI（曲げ剛性）を求め、荷重－EI曲線を画くとカ135図の如くなる。

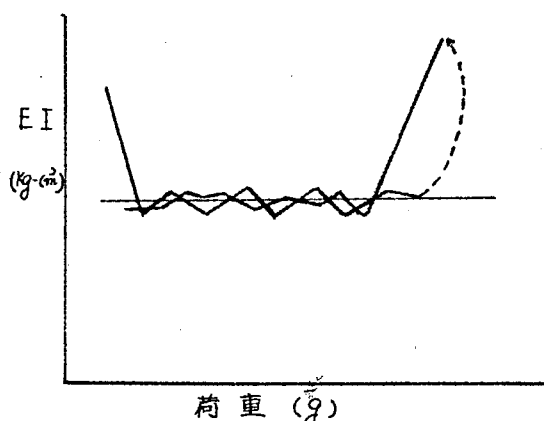
$$EI = \frac{e \cdot l^2}{8} \left( \frac{dW}{d\delta} \right)$$

カ134図  $\overline{AB}$ 、 $\overline{CD}$  間の平均変化直線はカ135図のEIの水平部の平均値となる。此のEIを其の撓線の曲げ剛性とする。当方法による測定結果は後節に述べる。

カ134図 荷重－撓み特性



カ135図 荷重増加毎のEIの変化



#### 8.2.2.7 その他

両端に荷重をかけて  $60^\circ$  曲げるに要する重量とか、固定した試験片を  $30^\circ$  曲げるに要す仕事量によると云ったものも公報されているが、取り上げる迄もない。

#### 8.2.3 撓線の曲げ剛性について <sup>(53)(62)</sup>

池田氏、上野氏は撓線の線間摩擦を考慮することなく蔓巻バ

ネの集合体として曲げ剛性を算出することを提議している。

すなわち、曲げ剛さ  $B_s$  は、

$$B_s = B_0 + N_1 B_1 + N_2 B_2 + \dots + N_n B_n$$

ここに  $B_0$  …… 中心線の曲げ剛さ、普通同心撚では  $B_0 = EI$

$B_1, B_2, \dots, B_n$  は 1 層、2 層 ……  $n$  層のスパイラル状素線 1 本の

曲げ剛さ

$N_1, N_2, \dots, N_n$  は 1 層、2 層 ……  $n$  層の素線本数

各スパイラル状素線の曲げ剛さ  $B$  は S. Timoshenko 氏、内海氏等により各種方法で非常に古くから誘導されている蔓捲バネの軸方向曲げの剛性係数で (63) (64)

$$B = \frac{\sin \beta}{\frac{1 + \sin^2 \beta}{2EI} + \frac{\cos^2 \beta}{2G I_p}}$$

ここに  $\beta$  : ピッチ角

$E$  : ヤング率

$I$  : 断面二次モーメント

$G$  : 剪断弾性係数

$I_p$  : 断面二次極モーメント

複合撚 (ロープ撚) の場合も子撚線 (子縄) の集合体であるから

各子撚線の 曲げ剛さ (相当  $EI$ ) を  $B_s$

捩り剛さ (相当  $G I_p$ ) を  $C_s$  (後出) とすれば、

*long helical spring* をなす子撚線の曲げ剛さは同様にして

$$B = \frac{\sin \alpha}{\frac{1 + \sin^2 \alpha}{2B_s} + \frac{\cos^2 \alpha}{2C_s}}$$

ここに  $\alpha$  は各子撚線のピッチ角

従つて前記同様の計算を繰返せば複合撚全体としての相当曲げ剛さが計算できる。

前項の梁の荷重-撓み曲線により実測せる結果と、上記蔓捲バネの集

合体として計算した値の比較例をオ23表に示す。

オ23表 曲げ剛性測定値と計算値の比較

線 種	項 目	測定値(Kg·mm <sup>2</sup> )	計算値(Kg·mm <sup>2</sup> )	測定値 計算値
7/1.0mm	ヒヤ4P=4/mm	3700	2834	1.31
"	(Sn×ツキ)P=4/mm	4330	2834	1.53
3/2.0mm	P=22.5mm	29200	18120	1.61
"	P=113.5mm	30000	22368	1.34
2/2.3mm	P=43mm	40900	25792	1.59
"	P=44mm	35700	"	1.39
"	P=65mm	37300	26050	1.43
"	P=99mm	36400	26400	1.38
7/2.6mm	38mm <sup>2</sup>	228000	158000	1.58
19/2.6mm	100mm <sup>2</sup>	533000	390000	1.37
37/2.3mm	150mm <sup>2</sup>	635000	476500	1.33
124/2.5mm	600mm <sup>2</sup> 中空	3200000	2211300	1.45
127/3.2mm	1000mm <sup>2</sup>	9680000	6130000	1.58

上記計算では、軟銅のヤング率を9580Kg/mm<sup>2</sup>、剪断弾性係数を4180Kg/mm<sup>2</sup>とした。これは古河理化学研究所磯部氏による20°Cの測定値である。(59)

EIの小さなものの測定にあたっては、ダイヤルゲージ接触圧をカウンターウェイトにより約50gに下げた。

計算値と測定値との比のバラツキは測定法にもよるが計算値は線間摩擦を全く考慮しておらず、線間摩擦の実体がこのようなものでもあると考えている。しかしオ23表の測定値は曲げ剛性が2000倍以上も異なる広範曲の測定であることを考えれば、<sup>測定値/計算値の</sup>バラツキは少いといつてよいであらう。

実測値と計算値の比は平均1.45倍であり、前記理論値により曲げ剛性を推定することができる。この比はワイヤー、ロープ等で発表されてい

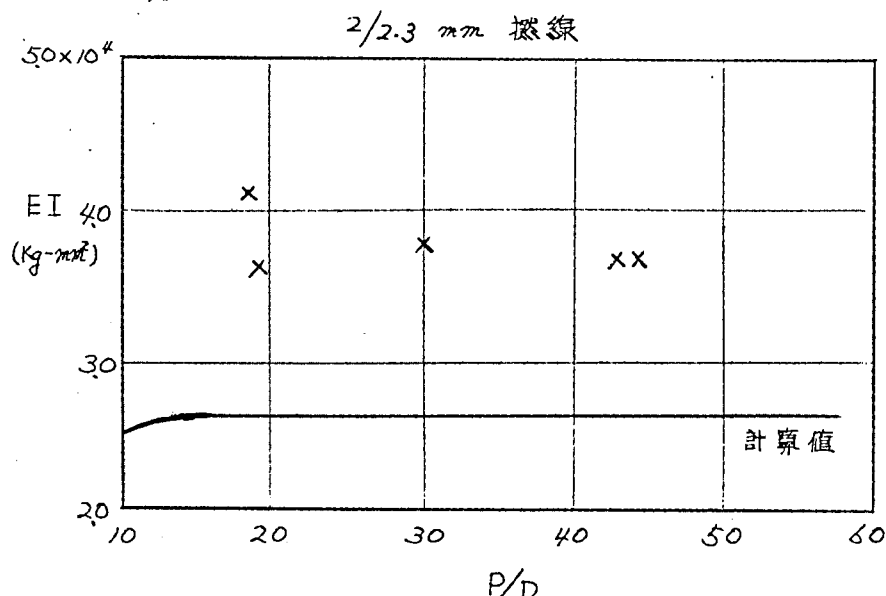
るものより大きく出ているが、<sup>(65)</sup> 鋼索油の有無および撚線時の変形度の相違によりケーブル導体では内部摩擦が大きい傾向にあると考えられる。なお実測結果ではケーブル油の内部摩擦に対する影響は少い。(オ9章オ31表参照)

上記計算では、

1. 同一断面積の場合、曲げ剛性  $B_s$  は素線数に逆比例する。
2. 同一素線の場合  $B_s$  は素線数に比例する。
3. 同一構成の場合素線径の4乗に比例する。

なお、理論値はピッチが小さくなるとともに減少するが、内部摩擦はこれと反するので、この影響を常に限界ピッチで撚られる2ヶ撹で調査した結果はオ136図に示す如くである。測定例は少なかつたが、むしろピッチと共に僅かながら下る傾向を示した。これは会田氏によるワイヤーロープの場合の発表例と全く同様である。<sup>(66)</sup>

オ136図 ピッチによる曲げ剛性の変化

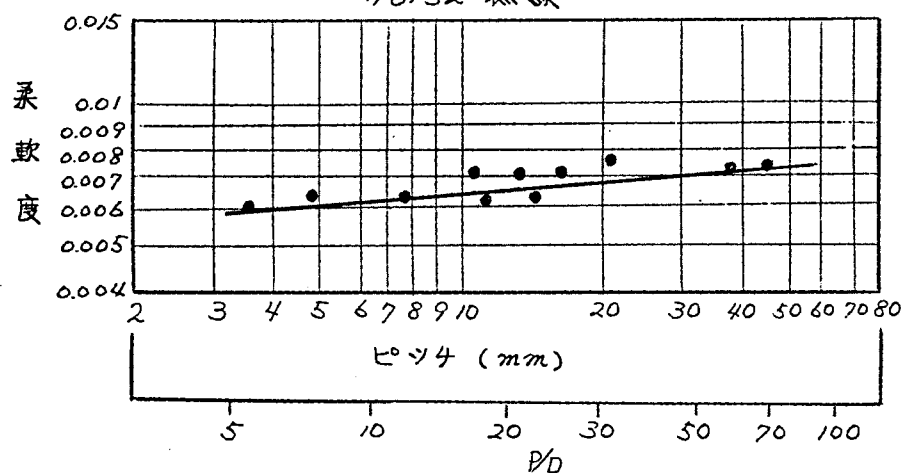


ちなみに、常に限界ピッチを越す7ヶ撹(細撹線)の場合、前節8.2.2.3による円盤始動モーメントから求めた各ピッチにおける柔軟性試験結果もオ137図の如くで、ピッチの小なるもの程、曲げ剛性が大となる傾向

を示している。

カ/37図 ピッチー柔軟度曲線

7/0.32 燃線



カ/38図にはピッチ角 $\sim B_s$  曲線を示すが、電力紙ケーブルで使用する範囲はピッチ角  $70\sim 80^\circ$  の範囲に限られるから、ピッチによる計算値の変動も少い。

また、上述の実験からもピッチによる差は少く、かへって僅かながら逆の傾向にあるので、ケーブル導体の場合は四より  $\frac{B_s}{d^4} = 450 \text{ kg/mm}^2$  にとり

$$\text{燃線の曲げ剛性} = 450 \times d^4 \times \text{素線本数} \times 1.45 \text{ kg-mm}^2$$

$$\doteq \boxed{650 \times d^4 \times \text{素線数} \text{ kg-mm}^2}$$

(ただし、1.45は  $E = 9580 \text{ kg/mm}^2$ 、 $G = 4180 \text{ kg/mm}^2$  と

した場合の理論値との比)

として実用上充分である。

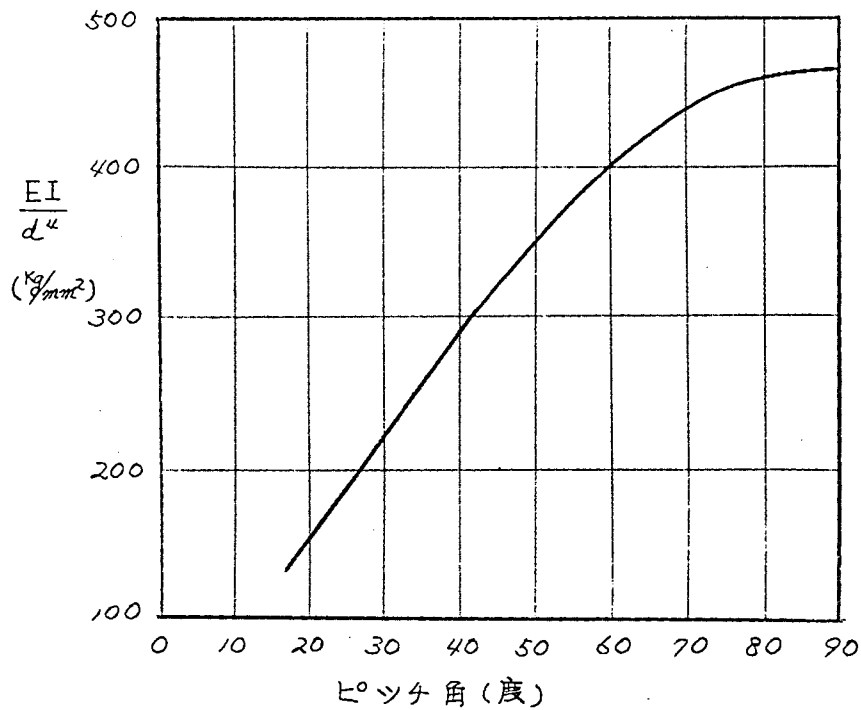
前記実験の中から曲げモーメント-曲率半径特性の例として

各層ピッチ	計算曲げ剛性
37本/2.3 m/m    143mm 173mm 222mm	476500 kg-mm <sup>2</sup>
2本/2.3 m/m                      99mm	26400 kg-mm <sup>2</sup>

なる極端に離れた(約20倍違う)二つの燃線の場合をカ/39図。

カノ40図に示す。

カノ38図 素線のEI図表  
(軟銅線線)



内部摩擦は当然材質および構造により変るが、前者は三層であり、層によつては限界ピッチを越したものもあり、後者は限界ピッチを越すことのないニケ擦で特にピッチも長くして( $\frac{\text{ピッチ}}{\text{ピッチダイヤ}} = 4.3\text{倍}$ )両者で摩擦による差が出やすいものを送んだ。

こゝで撓みは37本擦の時で2 mm以下。

2本擦の時で6 mm以下に押へた。

両図によれば、構造による差が相当あるにもかゝらず前記の計算式がケーブル導体の曲げ剛性推定に有力なものであることが分る。



第139図 曲げモーメントー曲率半径特性

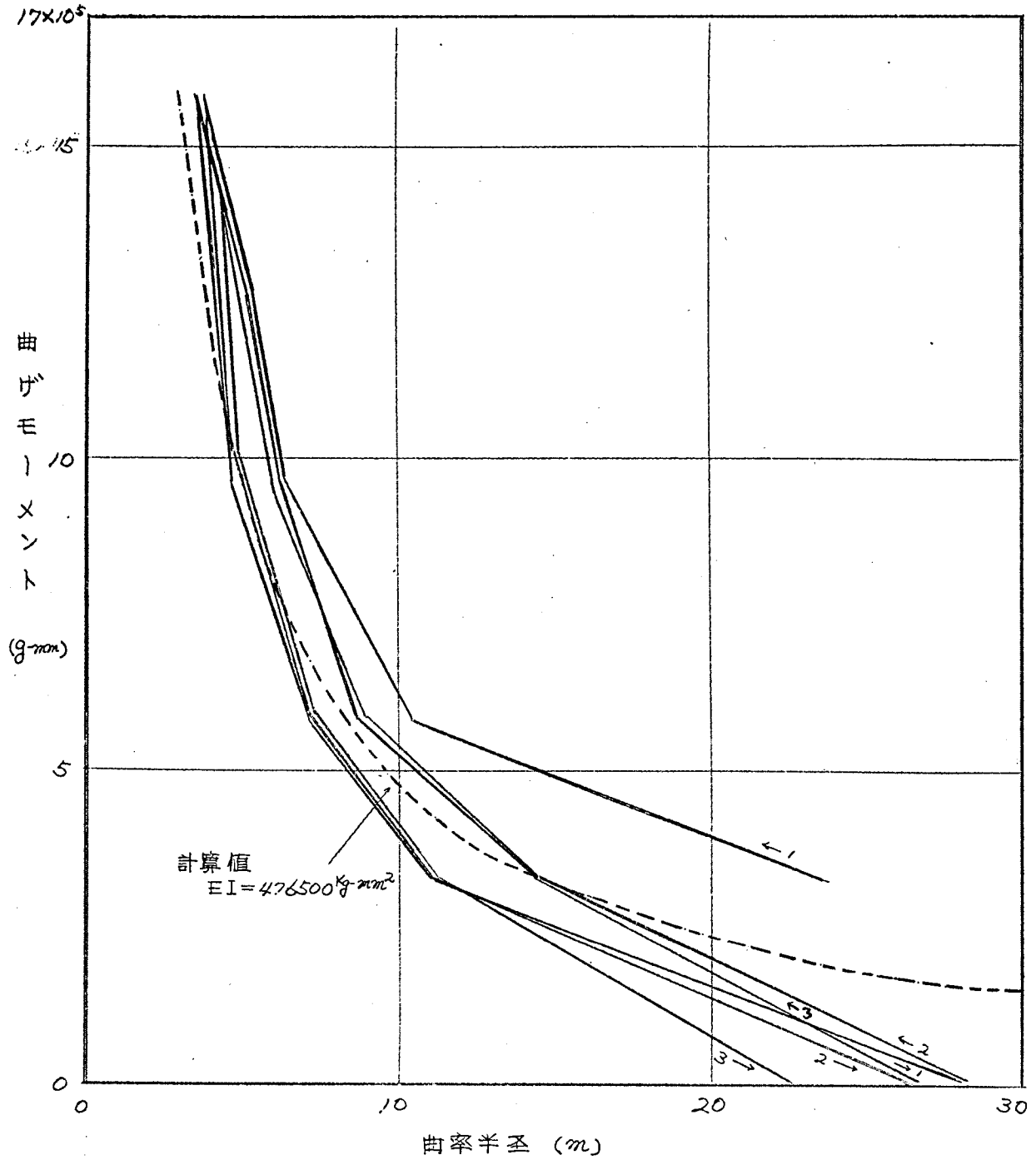
37/2.3 mm

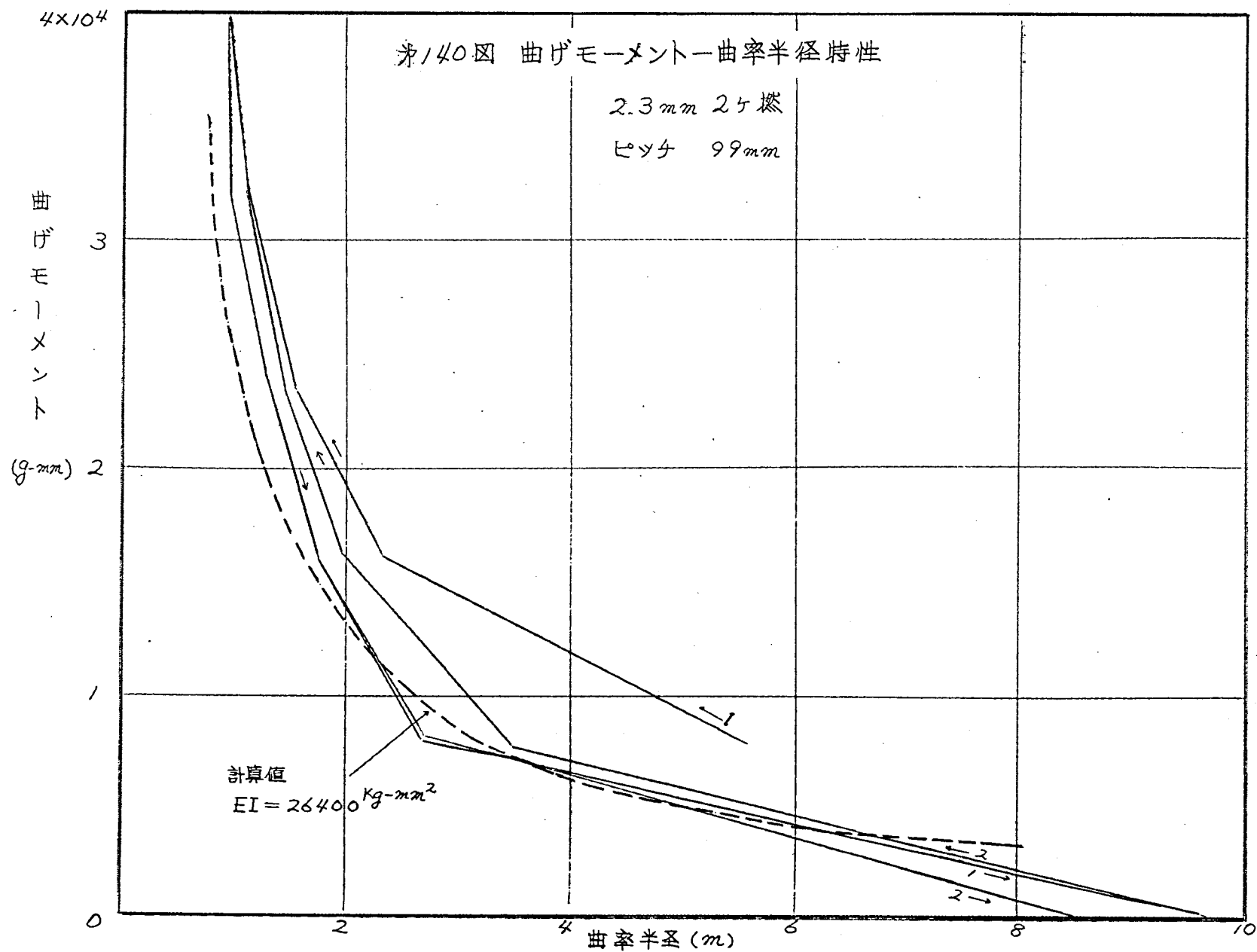
ピッチ 143 mm

173 mm

222 mm

外径 16.1 mm





#### 8.2.4. 結 言

本節においては電力紙ケーブル導体につき主として可撓性の研究を行った。

可撓性を表わす尺度としては多くの提案があるが、筆者は電力紙ケーブルの場合他の構成とのバランスをとつて可撓性を選ぶべきであるとの見地から、曲げ剛性 ( $EI$ ) の値そのものによることが最も好都合であることを提議して来た。これは現在電力ケーブル界で一般に採用されるようになった。

可撓性測定法についても過去に発表されたものを一通り実験検討した末、最も単純な涙の荷重-撓み曲線による方法を推奨し、これによる可撓性測定法が現在我国で行われている。

また、線向摩擦を無視した蔓捲バネ理論による計算値を上記の測定値と比較して、この計算値の有用なことを述べ、かつ、ケーブル導体の場合の曲げ剛性算出の実用式を導いた。この実用式は電力紙ケーブル関係者に利用されている。

これらは合理的な懸線構成を得るための基礎となり、また紙ケーブル以外のゴム絶縁ケーブル等の導体構成改良にも役立たせることができる。

### 8.3 燃線の換り特性について<sup>(67)</sup>

#### 8.3.1 緒 言

燃線の換り特性は最も基本的な機械特性の一つではあるが、電力ケーブル導体にあつては張力も加わることなく、また軟銅線であるので燃線自体としてはうねり、キンク等で向題を生ずることも少ない。

従つてここでは前の曲げ特性と同じく取扱いの易さ、すなわち、換り剛さ、ないしは換るに要するモーメントと云つたものを主に扱い、後章のケーブル全体としての換りにおける導体の占める割合の基礎となるものを知り、これにより燃線設計の改良に資することを主目的とした。

換り易さの表示方法は色々考えられるが、曲げの場合と同じく、ケーブルの外部構成と比較するため、換り剛性の値そのものをつた。また、換りの場合は曲げと異なり任意の換りを与えて換りモーメントを測定することも容易なので換りモーメント—換り角度曲線をも取り入れた。

電力紙ケーブル導体は、裸燃線では換りに関連した向題は少ないが、絶縁層の加わつた場合はうねり等の向題を生ずるので、これらを解明する一つの資料としても、また海底線鉄線鎧装のキンク向題等の基本としても燃線の換り特性を知つて置くことが必要である。

#### 8.3.2 燃線の換り剛さ計算値<sup>(62)(67)</sup>

換り剛性の理論的計算法としては、曲げ剛性と同様な考え方で池田氏、上野氏、は線向摩擦を考慮せず、蔓巻バネの集合体として次の如く算出することを提議している。<sup>(62)</sup> すなわち、換り剛さ  $C_s$  は

$$C_s = C_0 + N_1 C_1 + N_2 C_2 + \dots + N_n C_n$$

ここに、 $C_0$  : 中心線の換り剛さ、普通同心燃りでは  $C_0 = 6I_p$

$C_1, C_2, \dots, C_n$  : 1層、2層、……、 $n$ 層のスパイラル状素線1

本の換り剛さ。

$N_1, N_2, \dots, N_n$ : 1 層, 2 層 .....  $n$  層の素線本数

各スパイラル状素線の捩り剛さは S. Timoshenko 氏等により各種方法で古くから求められており、<sup>(63)</sup>

$$C = \frac{\sin \beta}{\frac{\cos^2 \beta}{EI} + \frac{\sin^2 \beta}{GI_p}}$$

ここに、 $\beta$ ,  $E$ ,  $G$ ,  $I$ ,  $I_p$  は前節と同じ

複合撚（ロープ撚）の場合も子撚撚（子縄）の集合体であるから、

各子撚線の、相当曲げ剛さ（相当  $EI$ ）を  $B_s$

相当捩り剛さ（相当  $GI_p$ ）を  $C_s$  とすれば

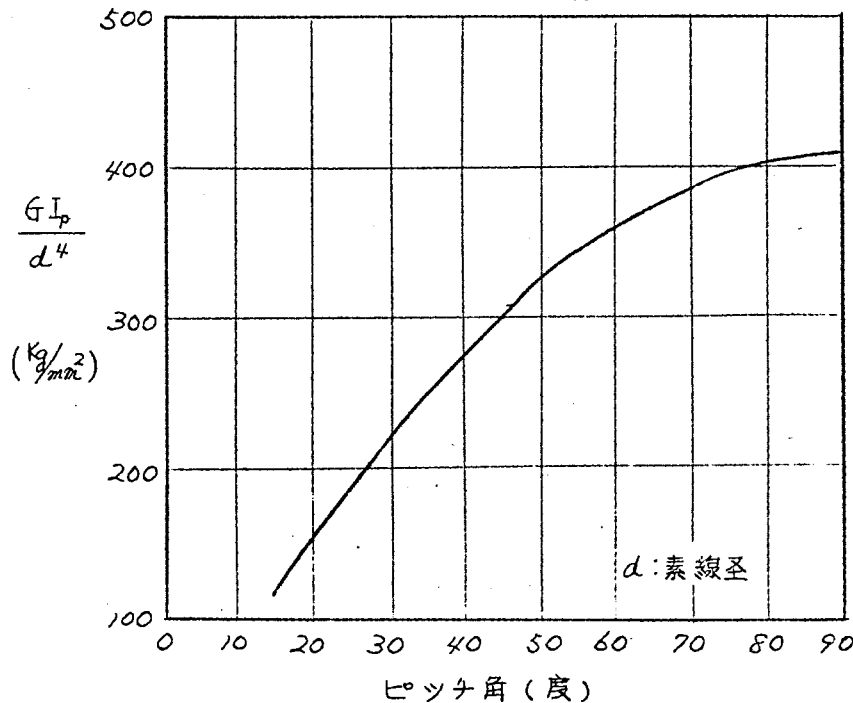
*long helical spring* をなす子撚線の相当捩り剛さは

$$C = \frac{\sin \alpha}{\frac{\cos^2 \alpha}{B_s} + \frac{\sin^2 \alpha}{C_s}}$$

ここに、 $\alpha$  は各子撚線のピッチ角

表 141 図 素線の  $GI_p$  図表

（軟銅撚線）



従つて前記同様の計算を繰返せば、複合線全体としての相当換り剛さが計算できる。

前節と同様ヤング率  $9580 \text{ kg/mm}^2$ 、剪断弾性係数  $4180 \text{ kg/mm}^2$  として以下計算を行つた。第141図には素線の換り剛さとピッチ角の関係を示す。

計算値によれば

1. われわれの通常使用するピッチ角範囲では  $C_s$  の変動は少い。

(電力ケーブル導体ではピッチ角  $70 \sim 80^\circ$  に限られる。)

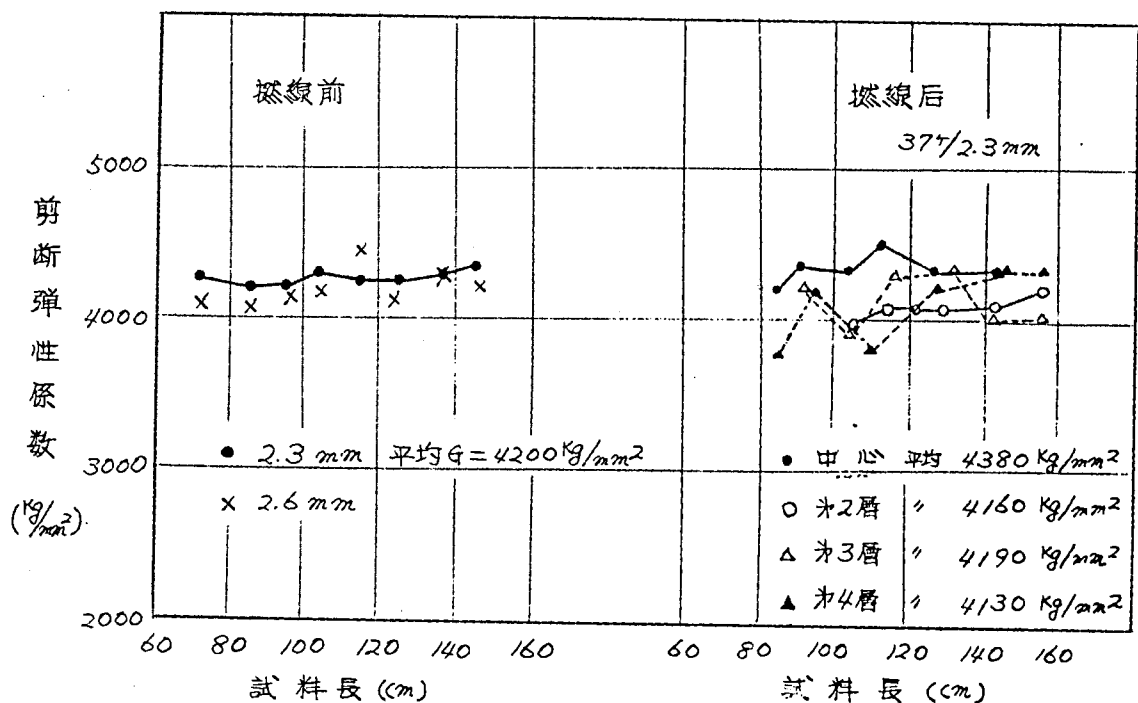
2. 同一断面積の場合、 $C_s$  は素線数に逆比例する。

3. 同一素線の場合  $C_s$  は素線数に比例する。

4. 同一構成の場合素線径の4乗に比例する。

換り剛さは、曲げ剛さの場合と異なり、残留応力、層間圧合、線間摩擦により大いに変るが、異なる構成を比較する場合、上記は参考になると思う。

第142図 撚線各層素線の剪断弾性係数



なお、燃線の捩り剛性に最も影響する素線の剪断弾性係数は、前記碓部氏によるものを用いたが、燃線加工後の影響を見るため、各層毎の素線剪断弾性係数を捩り振動によつて測定した。上端はウッド合金にて鑄込み、下端に約250gの木円盤をとりつけて捩り、週期により測定した結果をオノ42図に示す。

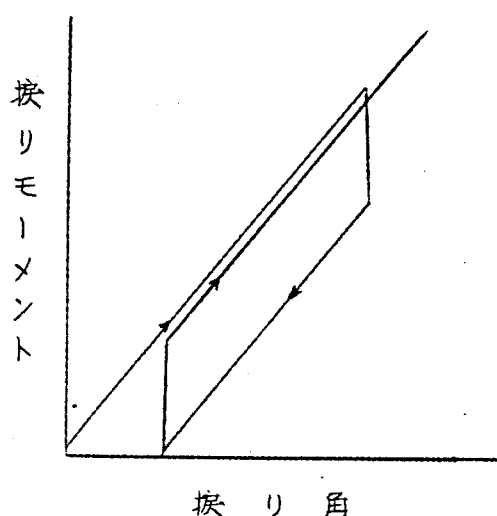
いずれも燃加工による影響は見られず、碓部氏による $4.180 \text{ kg/mm}^2$ に近い値であつたので、そのまま使用して計算した。

### 8.3.3. 燃線の捩り剛さ測定<sup>(67)</sup>

燃線の捩り剛性 ( $G I_p$ ) 測定法としては曲げ剛性 ( $E I$ ) 測定法に倣い、つぎのような方法によつた。

すなわち、捩り角度—捩りモーメント特性曲線の一点において、モーメント0になる迄捩り角度を戻してから、再び元の角度迄捩り、これを二、三回繰返して、ヒステリシスループを画かしめれば、ほぼ平行四辺形となる。この比例部分をとつて  $G I_p$  を算出した。

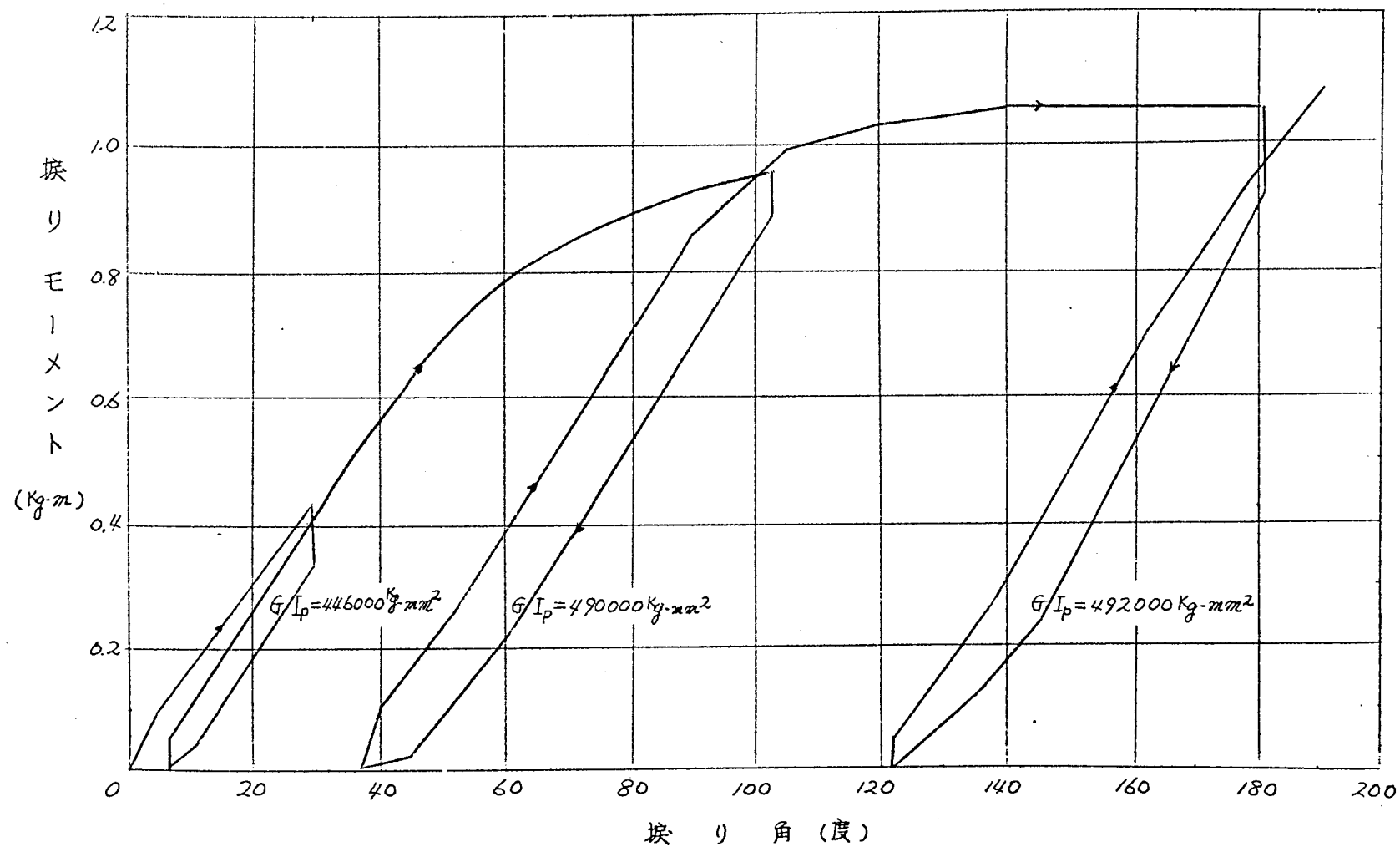
オノ43図 捩り角—捩りモーメント特性



実際の測定では試料はいずれも50cmとし、 $30^\circ$ 、 $100^\circ$ 、 $180^\circ$ の三度で戻して測定を行つた。26本の試料についての実験結果によれば、

※144図 捩り剛性測定の一例

普通交互捩 (37/2.3) 左捩り





30° → 100° → 180° と角度が増すにつれて  $G I_p$  の値は増す傾向にあったが、その差は少い。

測定例を  $\Phi 14.4$  図に示す。なお、両端部はウッド合金にて鋳込み、素線の回転および層間のすべりを防いだ。

$\Phi 24$  表には動力ケーブル導体で最も一般的な  $150 \text{ mm}^2$  ( $2.3 \text{ mm}$   $37$  ケ捻) を交互方向捻 (最外層右捻)、同方向捻 (右捻) の両者につき、各層ごとに右捻り方向、左捻り方向の捻り剛性を測定し、蔓巻バネの集合体として計算した値と比較して示す。なお右捻りとは国内電線界の習慣に従い  $S$  捻りを云う (以下これに倣う)。

$\Phi 24$  表 捻り剛性測定値と計算値との比較

	捻り方向	測定捻り角位置 (度)	交 互 捻 り		同 方 向 捻 り		捻り剛性計算値 ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ )
			捻り剛性測定値 ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ )	計算値との比	捻り剛性測定値 ( $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ )	計算値との比	
37/2.3	右捻り	30	外層右 1624000	3.93	333000	0.814	409200
		100	* 1684000	4.10	340000	0.83	"
	左捻り	30	* 446000	1.09	302000	0.74	"
		100	490000	1.20	324000	0.79	"
19/2.3 (最外層を除く)	右捻り	30	外層左 155800	0.76	226000	1.1	205731
		100	167200	0.815	218000	1.06	"
	左捻り	30	* 261600	1.27	155600	0.757	"
		100	322000	1.57	140600	0.685	"
7/2.3 (最外層および オ三層を除く)	右捻り	30	外層右 (51600 49400)	0.745 0.714	左に同じ		69331
		100	57400	0.83			"
	左捻り	30	(39600 47400)	0.572 0.684	左に同じ		"
		100	—				"

註 — \* 印のものは層間圧合あり。

表24表より、つぎのことが考察できる。

1. 同方向撚においては、締り方向換りは弛み方向換りよりも換りにくい。これは線間に圧縮力、摩擦力、残留応力が働くから当然考えられることである。このことは、19本撚りで換り剛性の直が、  
同方向撚右換り > 交互撚右換り > 同方向撚左換り  
(内層外層とも締り方向) (外層弛み方向内層締り方向) (外層内層とも弛み方向)  
であることで、さらに明瞭である。

2. 層間の圧合のない場合(表中※のないもの)は、素線の換り剛性の合計より撚線の換り剛性は小さい傾向をもつ。

(われわれの扱うピッチ角範囲では、スパイラル状素線も真直な素線も換り剛性は3%程度の差しかないから、計算値は前節の実験撚線前のより、真直な素線の換り剛性測定値の和と考えてよい。)

このことは曲げの場合と大いに異なる点で、後述の如く撚線加工により素線に生じた応力が残り、弛み方向のモーメントをもつことが大きく影響していると考えるが、締り方向の換り試験結果も一部を除き小さ目に出ているのは説明できない。

3. 内層が弛み、外層の締るもの、すなわち、層間圧合のある場合(表の※印)は換り剛性は増大し、素線数とともに急増する。
4. 蔓捲バネの集合として摩擦を考慮しない計算値は、圧合のない場合、大略の推定値を与えるには役立つ。

#### 8.3.4 換りにおける層間圧合および線間摩擦<sup>(67)</sup>

前項迄の換り剛性は弾性域における換り易さを量的に表示するものであるが、実際に重要なのは塑性域における換り特性である。

ここでは換りを加えた場合の換りモーメントにつき調査し、前項にのべた層間圧合および線間摩擦をさらに詳細に検討する。試料は前項と同

じ  $150\text{ mm}^2$  ( $2.3\text{ mm}$  37ヶ擦)を用いた。

オノ45図、オノ46図には交互擦線、同方向擦線の挟りモーメント—挟り角度特性を示す。

実線は右擦り方向、点線は左擦り方向であるが、いずれも約 $2\sim 3\text{ deg/cm}$ で飽和し始める。擦線の挟りにおいて、圧合および摩擦に要するモーメントの量を測定することは困難であるが、大体どの程度のものがあるかを推定することはできる。そのため、オノ45図、オノ46図を書きかえてオノ47図、オノ48図を作成した。

これにおいては、7ヶ擦の時のモーメント量を基準とし、19ヶおよび37ヶのモーメント量を出し、これと実測との差を圧合および摩擦に要するモーメントと考えて、これを斜線の部分で表示した。 $(a_1, \dots, a_4, b_1, \dots, b_4$  部分)

7ヶ擦りを標準としたのは、7ヶ擦の右擦り、左擦りにおけるモーメント量にほとんど差がなく、線間摩擦に要するモーメントの絶対値も非常に小さいと考えられるからである。

オノ47図、オノ48図によれば

1. 締めり方向に挟るに要するモーメントは、主として残留応力および線間の摩擦のため、弛み方向に挟るに要するモーメントより大きい。
2. 圧合、摩擦等に要するモーメントは挟るに要する全モーメントの $\frac{1}{3}\sim\frac{2}{3}$ を占める。
3. 図において  $a_1 > a_3$ ,  $b_2 > b_3$  であるから、内層が弛み方向に挟られる時の層間の圧合に要するモーメントは、外層ともに締めり方向に挟られる場合の線間の摩擦に要するモーメントより大きい。

図 45 交互捻線の捩りモーメント - 捩り角特性

37ヶ線 / 2.3 mm

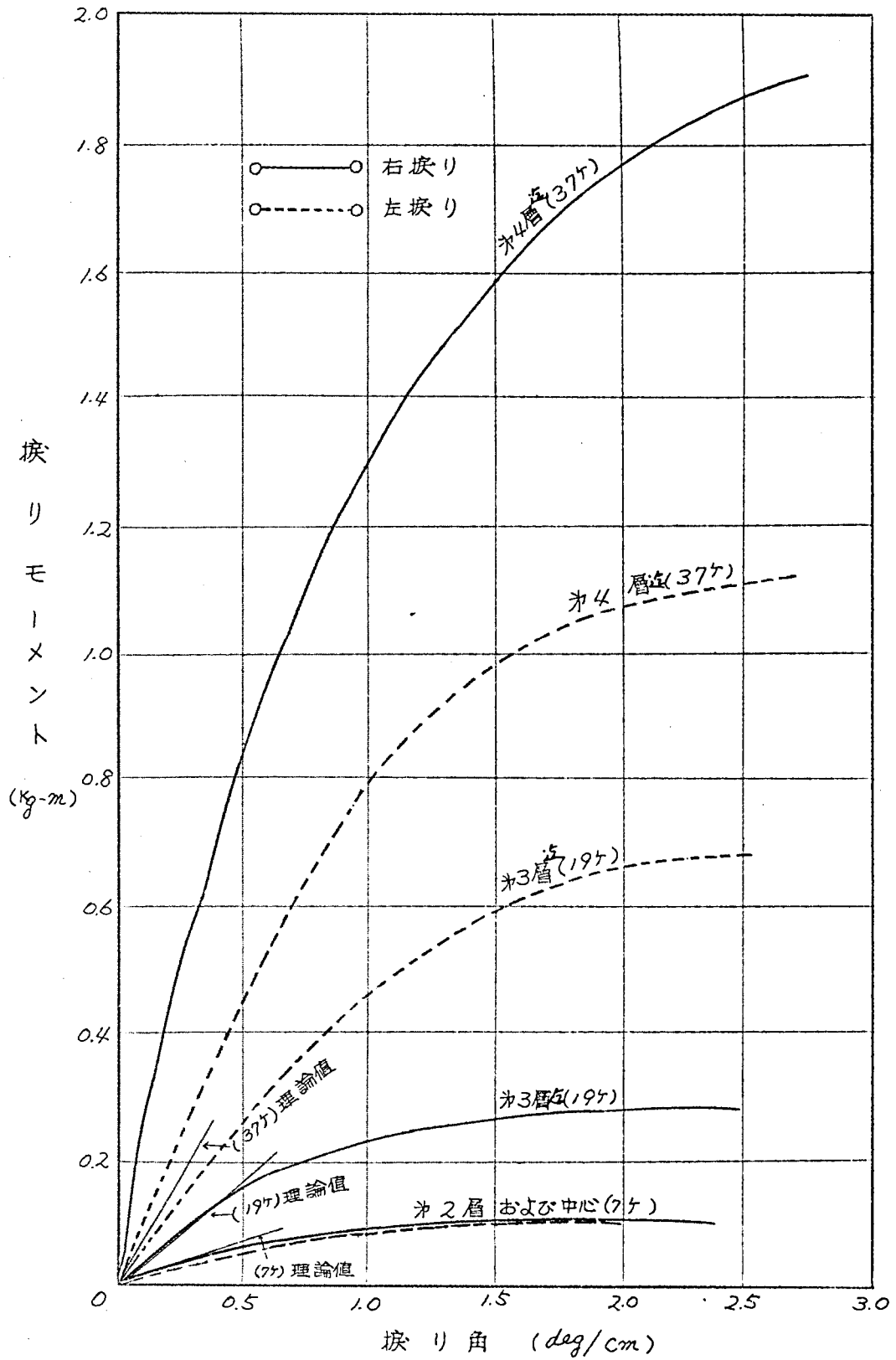


図146 同方向線線の捩りモーメント-捩り角特性

37ヶ捩/2.3mm

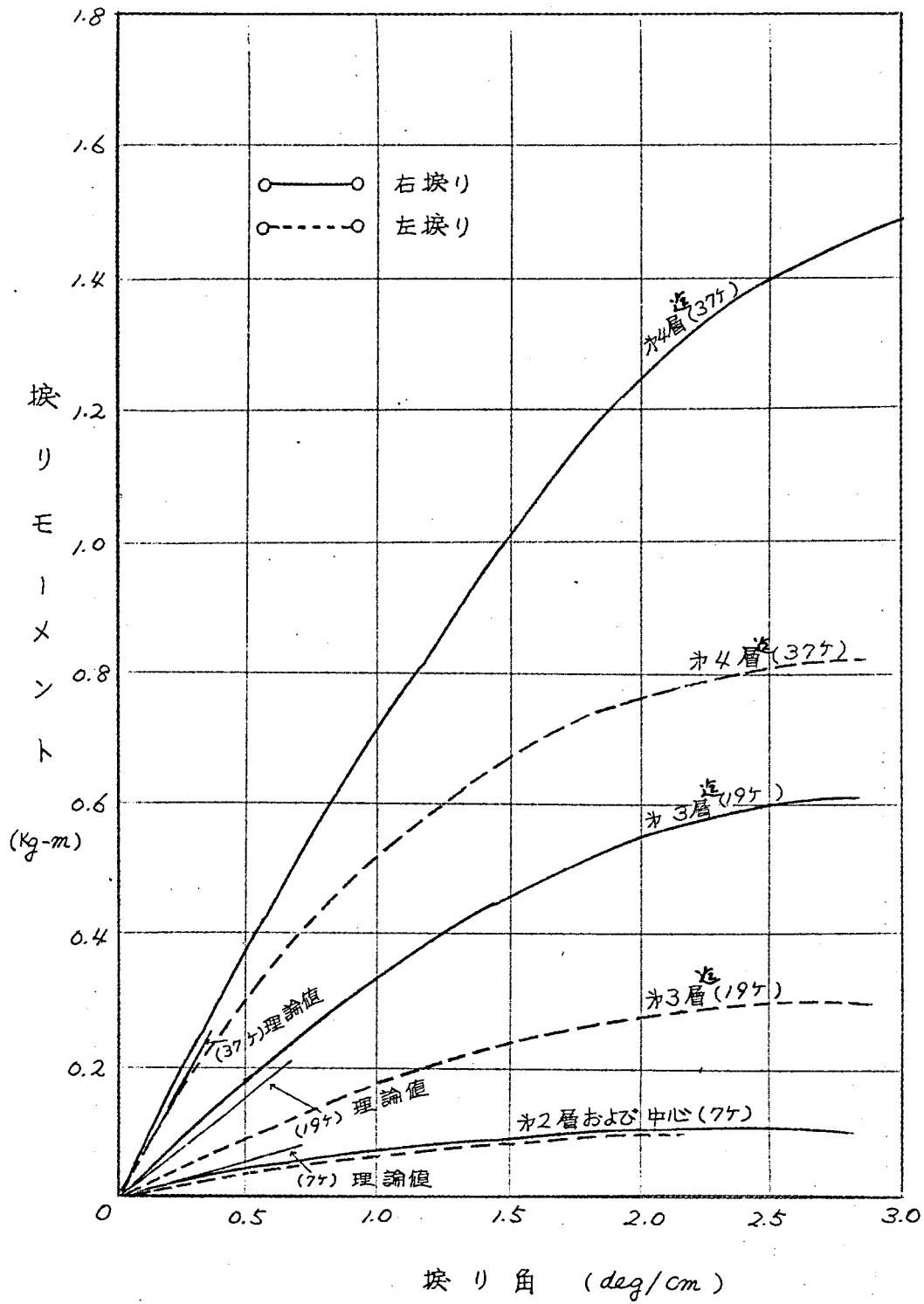
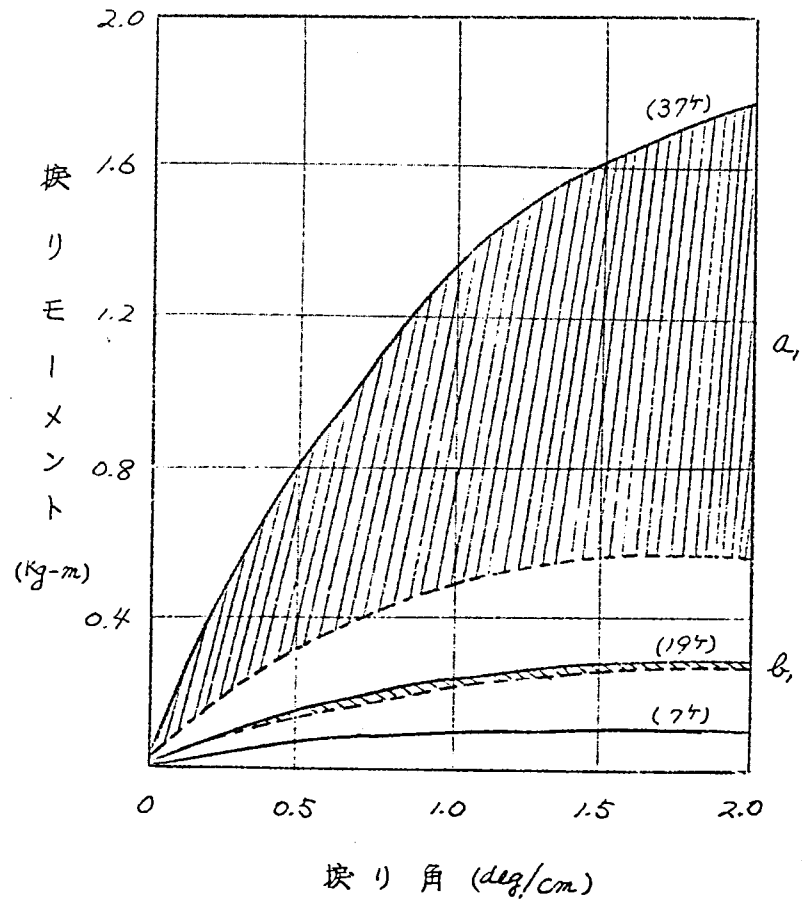


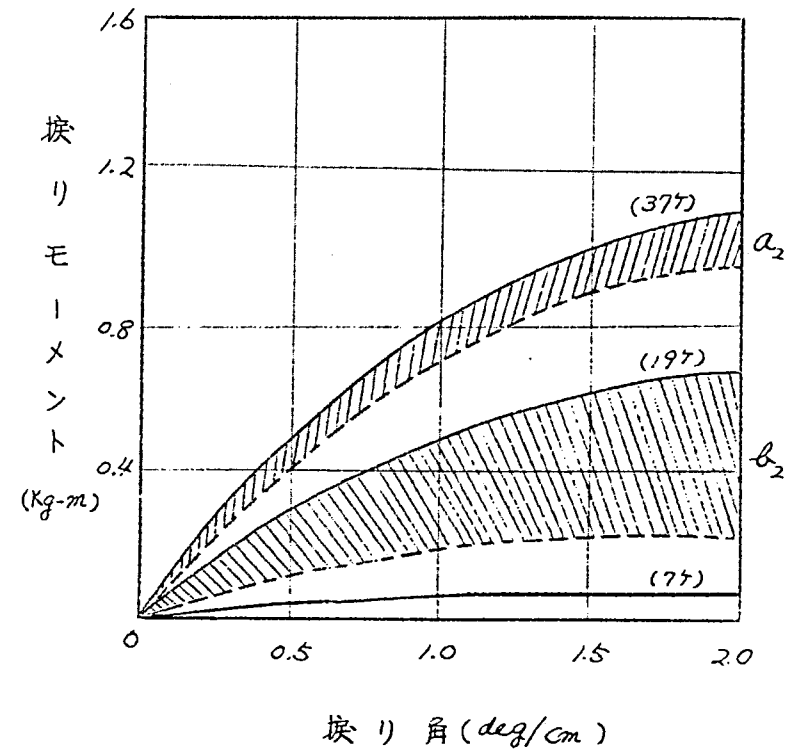
図147 交互燃線の換り特性

37ヶ燃/2.3mmにおける各層毎の圧合および摩擦を示す。

右 換 り

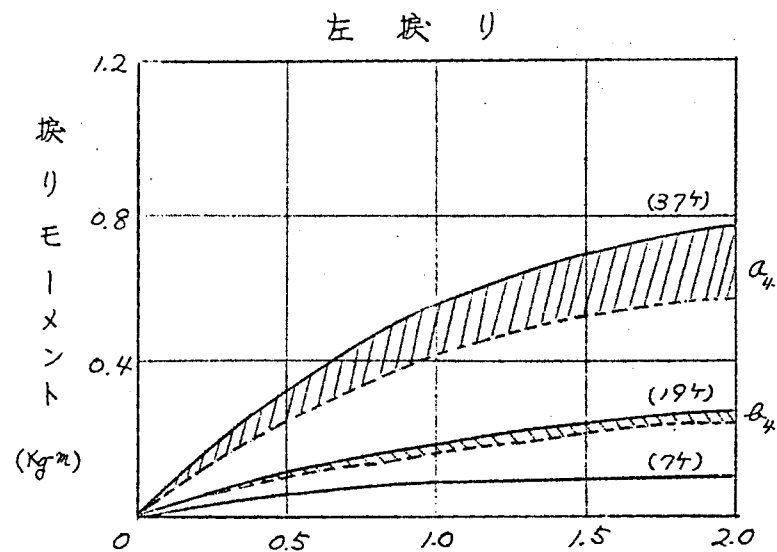
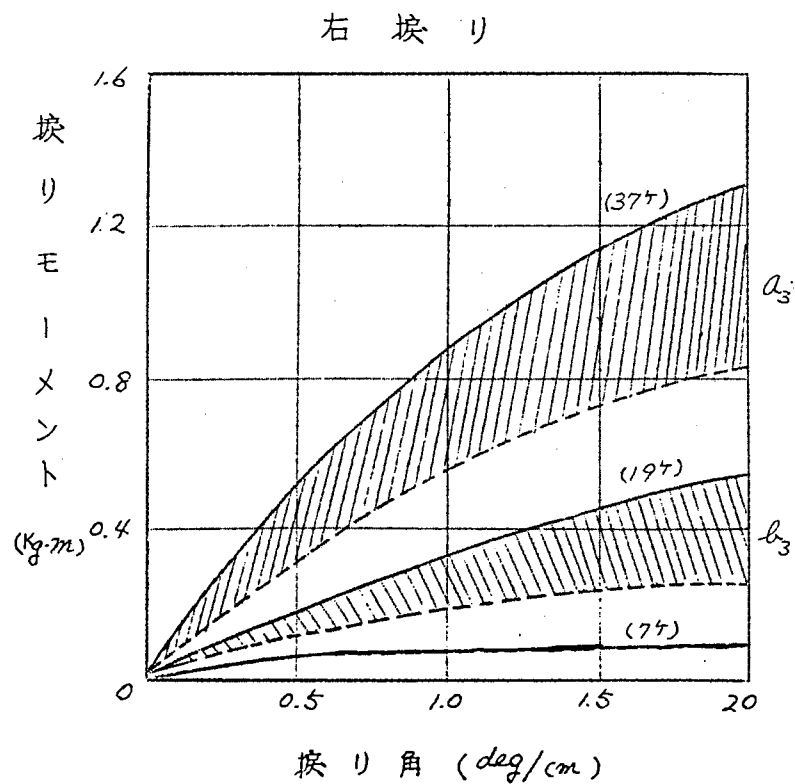


左 換 り



# 表148 同方向燃線の換り特性

37ヶ燃/2.3mmにおける各層毎の圧合および摩擦を示す



4. 弛み方向に換られる層の換り以外に要するモーメントは少いが

$a_2, a_4$  と  $b_1, b_4$  を比較すれば、最外層 18 本では本数の割合以上に急増している。

これによる素線の彎曲にもとづくモーメント  
これは外層程換りによる素線移動量が多いので、~~摩耗~~が増すためであると考え。

### 8.3.5. 撚線加工中の残留応力<sup>(67)</sup>

本節 8.3.3 に示した如く撚線の換り特性は曲げの場合と異なり、層間圧合のない場合は素線の換り剛性の合計より少い値を示す傾向にある。これは撚線加工により素線に生じた応力が残り、弛み方向のモーメントをもつことが考られるのでこれに関し考察した。

ケーブル撚線では普通撚返し付（ハラセの場合）で撚線される。（撚返しが必要かどうかは銅撚線の場合は問題である。撚返しなしの撚線機で不反発加工をなし回転数をあげているところもある）

従つて素線は 1 ピッチ毎に、（7.3.2 参照）

$$\varphi = -2\pi(1 - \sin \beta) \quad \text{ここに } \beta : \text{ピッチ角}$$

の換りを受ける。また、

$$\rho = D / \cos^2 \beta \quad \text{ここに } D : \text{ピッチ直径}$$

なる曲率半径の曲げ加工を受ける。

これに要するモーメントの撚線軸方向の分力はそれぞれ

$$M_{\varphi} = - \frac{G I_p}{D} (1 - \sin \beta) \sin \beta \cos \beta$$

$$M_{\rho} = \frac{E I}{D} \cos^3 \beta$$

ここに、E : ヤング率

G : 剪断弾性係数

I : 断面二次モーメント

$I_p$  : 断面二次極モーメント



これら加工により生じた応力は相当程度残っており、そのため捻線自身戻れようとする性質をもつ。

すなわち、上記  $M_g$  による残留応力は締め方向に、 $M_p$  によるものは弛む方向に換ろうとし、一般に  $M_p > M_g$  であるから、捻線は自由になると弛み方向に戻ろうとする。

捻返しのない場合は(ハラハラの場合)

$$M_g = \frac{G I_p}{D} \sin^2 \beta \cos \beta$$

となるから、 $M_g$  による残留応力は方向反対となり、捻返しのない時に比して弛みやすい。

残留応力として、どの程度残るかは材質、素線径、素線の戻れ角、曲率半径等により定まり、また製造中の加工工程により変るが、捻線直後に残る残留応力が大体どの程度であるか一応の目安を得るため、つぎの如き実験を行った。

使用捻線	7/2.6,	12/2.3,	18/2.3	同方向捻
	糸2層(6本)	糸3層(12本)	糸4層(18本)	
ピッチ	150 m/m	182 m/m	234 m/m	
ピッチ/ピッチダイヤ	28.8	18	15.8	

試料の都合上、やむなく上記の如き 150 SQ 圧縮導体構成の圧縮前のものを使用し、左換り(弛み方向)の換りモーメント-換り角特性を測定した。なお、この試料は巻取前のまげをうけないものを用いた。

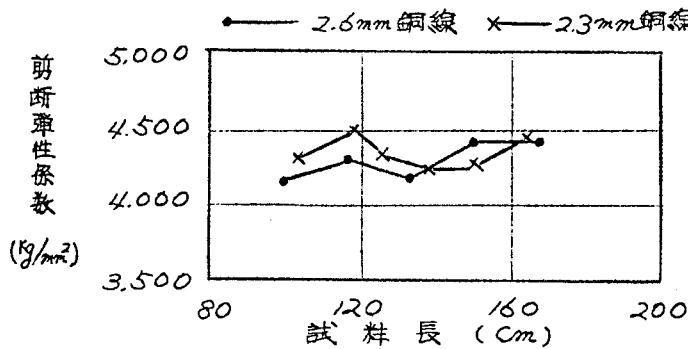
つぎにこの線を 300°C にて2時間加熱し焼戻しを行い、同様左換特性を測定した。これら両者の特性を Fig. 150 に示す。

焼戻しにより残留応力はほとんどなくなると考えられるから、焼戻しによるモーメントの増加分は残留応力によるものである。焼戻し前後における剪断弾性係数に変化があればこれはもちろん考慮しなければなら

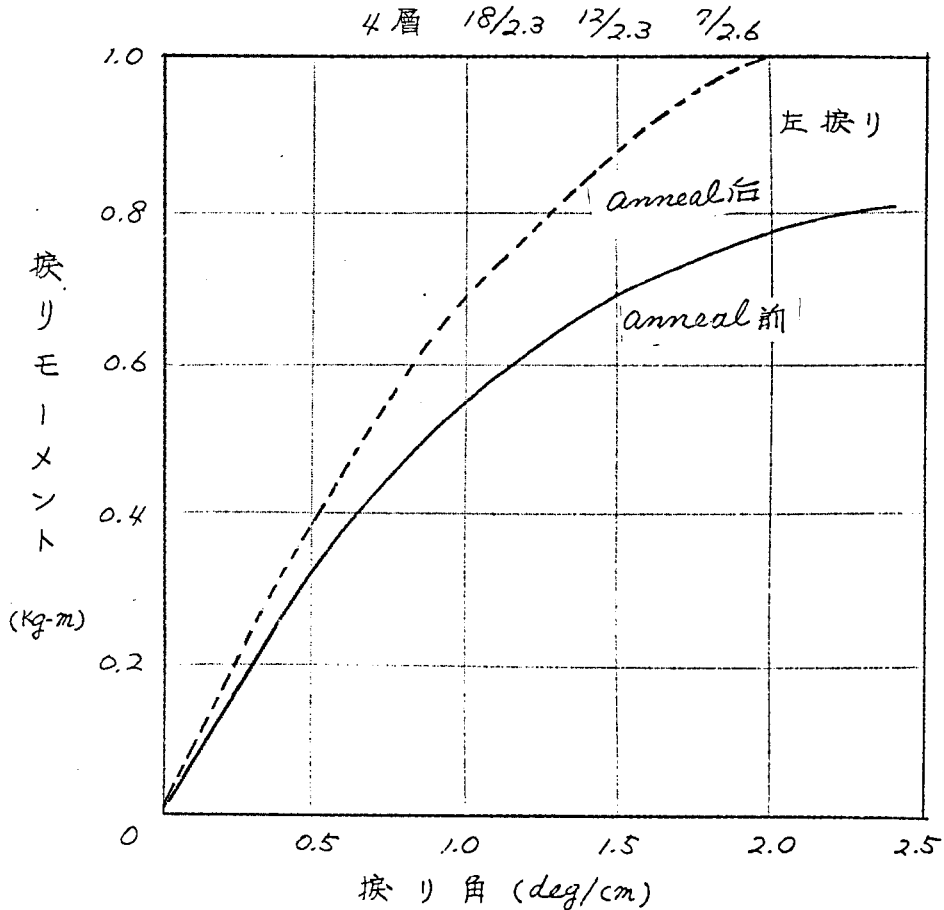
ぬが、実測の結果剪断弾性係数は**小さくなる**とは思われない。(オ149図)

実験結果では残留応力によるモーメントの量は戻りモーメントの約2割であった。同方向右捻線の左戻り(弛み方向)特性を取ったのは圧合および摩擦を減らす目的であるが、前項に説明した如く摩擦等に要するモーメントが相当ある。

オ149図 焼鈍後の剪断弾性係数の値



オ150図 焼鈍前後の捻線の戻り特性  
普通同方向右捻



### 8.3.6 扇形撚線の撚り特性

二心、三心ケーブルにおいてはケーブル外径の減少を計るため、半円形および扇形撚線が用いられる。このような非円形撚線において太物の場合撚返し付に撚るためあらかじめ、撚合ピッチに適合するピッチに撚りをあたえて置く予撚り撚線 (*pre-formed strand*) が用いられる。

これら扇形撚線 (交互撚) の撚りの基本特性を知つて置くことも重要なので、 $150 \text{ mm}^2$  の場合につき右撚りおよび左撚りの撚り角-撚りモーメント特性を円形撚線の特性と比較してカ / 5 / 図に示す。

右撚り (最外層締めり方向)、左撚りとも円形撚線の時と同様な傾向を示す。予撚の場合、予撚方向はケーブル、コアーの撚合方向に従い右撚りに定められているが、右撚り、左撚りとも予撚のない場合に比して大きい。

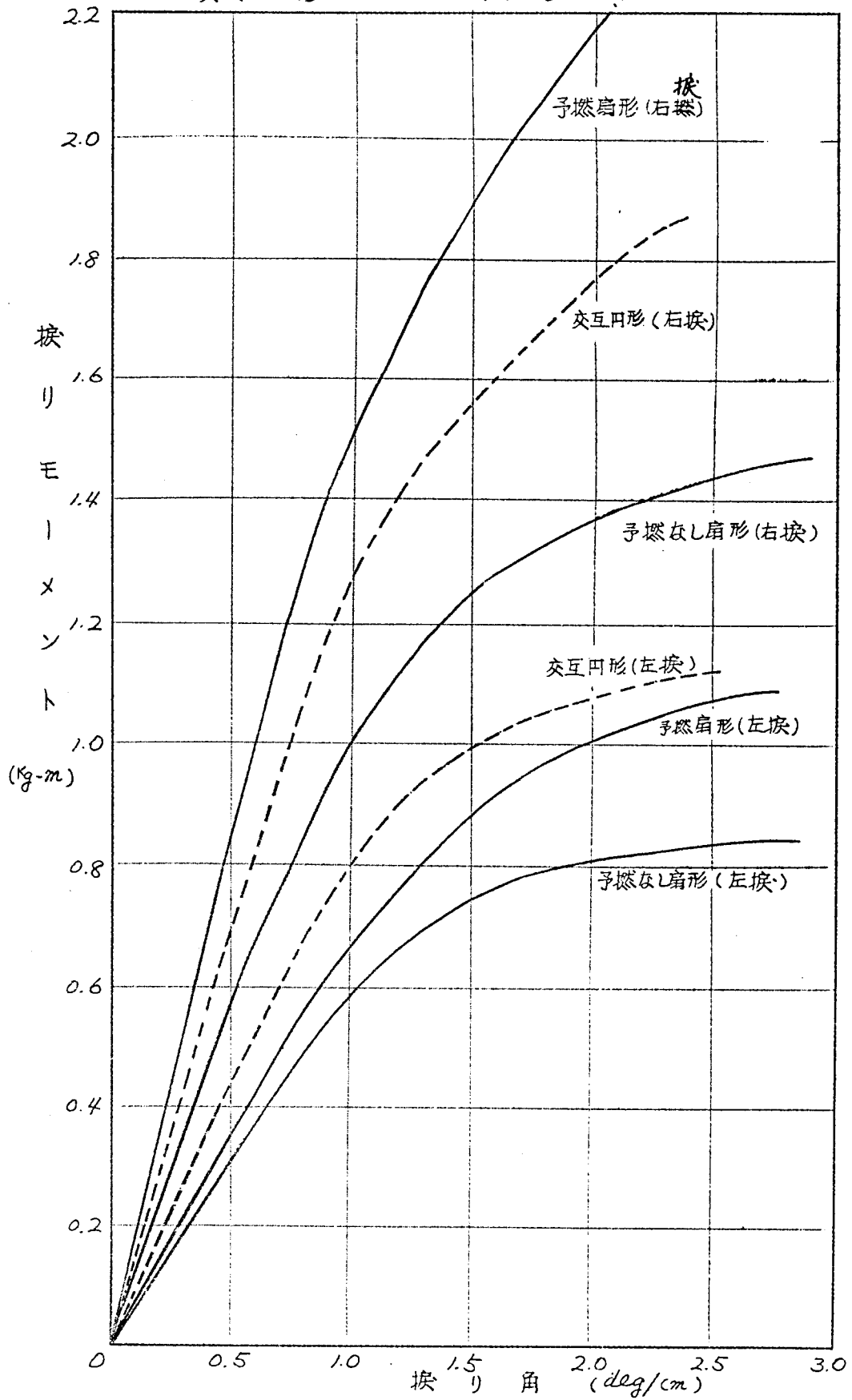
上記測定では丸形および扇形の撚線構成の等しい  $150 \text{ mm}^2$  を送んで比較した。扇形撚線の撚線構成は JIS においては丸撚線の構成に準拠して定められたと思われるが、

$250 \text{ mm}^2$	丸	61/2.3	扇	38/2.9
$150 \text{ mm}^2$	丸	37/2.3	扇	37/2.3
$125 \text{ mm}^2$	丸	19/2.9	扇	39/2.0

といった如くにバランスのとれたものではない。後章に丸撚線の構成につき説明するが扇形の場合も実際の撚り角は小さいから、もつと簡単な構成にしてバランスのとれたものに変えるべきであろう。

ヲ 151 図 扇形 撚線の 戻り 特性

150mm<sup>2</sup> 交互扇形 最外層右撚り  
 異線は比較のために同サイズの円形撚線の特性を示す。



### 8.3.7 結 言

以上本節においては電力紙ケーブル導体の捩り特性につき、研究を行った。

前節同様捩り易さの尺度として捩り剛性そのものを取り、蔓巻バネ理論と比較した結果は層向圧合のない場合には有用であることを示した。

また交互捩線および同方向捩線の右捩り、左捩り時の各層捩り剛性、捩りモーメントを比較することにより、線間摩擦、層向圧合の大きさを明らかにし得た。捩線加工で生じた残留応力によるモーメントは実験結果によれば約2割であった。

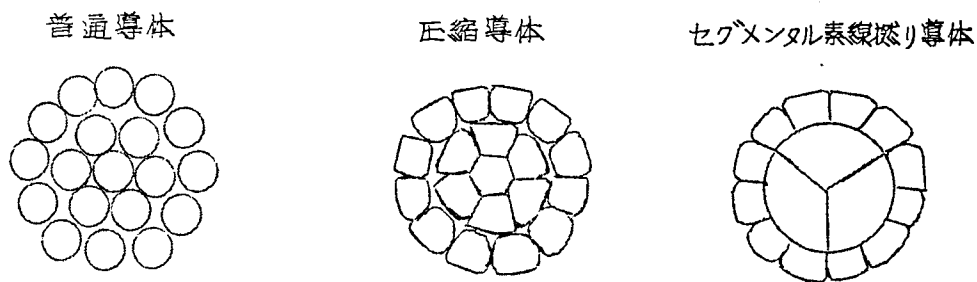
扇形捩線についても測定を行ったが、円形捩線と同様な傾向を示し、予捩のある場合は、ない場合に比し捩りモーメントは大きい。

## 8.4. 特殊撚線の機械的特性 (68)(69)(70)(71)

### 8.4.1. 緒 言

電力紙ケーブルは、撚線上の電位傾度を下げ、外径を減少する目的で圧縮導体およびセグメンタル素線撚り導体等を用いる。これら両撚線の採用に当って、これによりケーブルの曲げ剛性、捩り剛性が増大し、接線作業等が困難になることを懸念されたので、その特性を明らかにし、普及を円滑ならしめるため、研究を行った。

図 152 各導体の断面



### 8.4.2. 圧縮導体の特性 (68)(69)

#### 8.4.2.1 可 撓 性

圧縮導体は標準導体の断面積より大なる構成のものを撚線加工時圧縮を加えて製作するが、その構成および圧縮方法により特性を異にする。

占積率は普通導体は約 75% であるに比して 90% 程度迄向上し、外径も小となるので、曲げ剛性の値以外の比較も必要と考え、同一直径の銅棒の曲げ剛性と撚線のそれとの比を可撓度  $F_d$  として比較した。

表 25 は  $150 \text{ mm}^2$  導体での測定例を示す。これによれば、圧縮導体は普通導体に比し可撓度  $F_d$  は 60 ~ 70% であるが、

導体の曲げ剛性の値は大差なく、これにより ケーブルの曲  
げ剛性を大きくするような恐れはない。

※25表 圧縮導体の曲げ剛性

線 種	外 径 (mm)	EI (kg-cm <sup>2</sup> )	F <sub>d</sub>
37/23 普通交互撚	16.1	6350	49.5
# 1 圧縮導体	15.25	7710	33.0
# 2       〃	14.48	6295	32.8
# 3       〃	14.15	6050	31.0

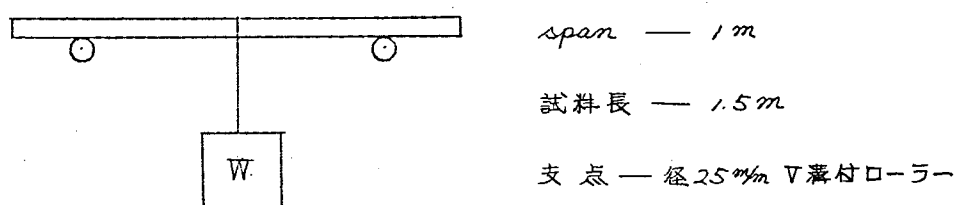
(ただし、銅のヤング率を 9530 kg/mm<sup>2</sup> とした。)

#### 8.4.2.2. 静的集中荷重撓法に依る撓線の荷重変位特性

上記 150mm<sup>2</sup> 普通導体および圧縮導体を試料に採り比較した。

(※153 図参照)

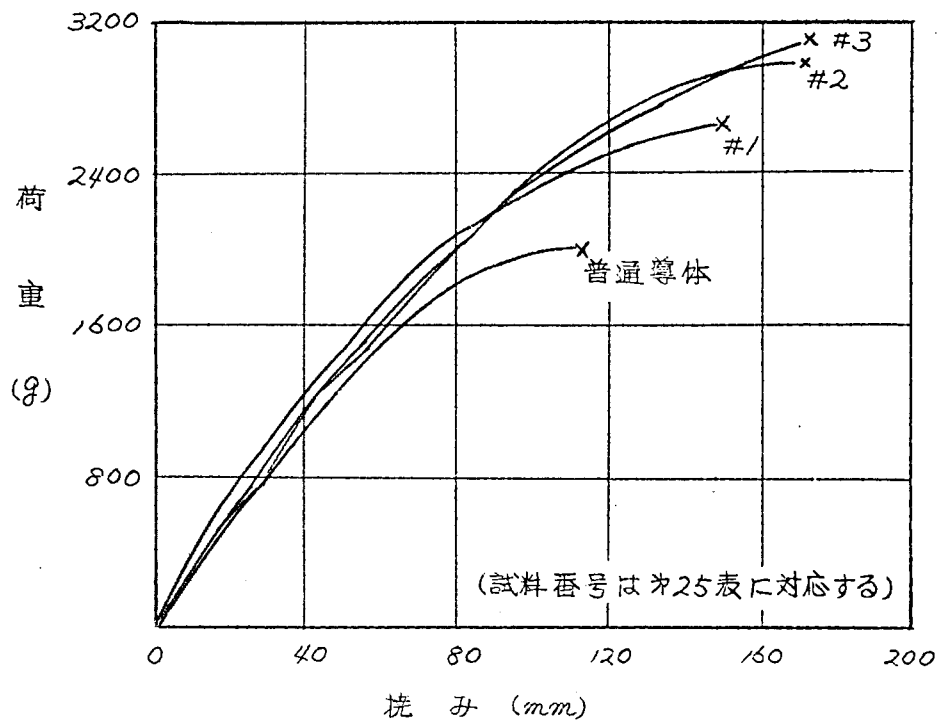
※153 図 撓線の荷重変位特性測定



※154 図に測定結果を示す。図の実線の最終点で撓線がズレ落  
ちたもので、撓みの量が比較的大きい臭でズレ落ちたもの程、比例限  
度も大きいと判断出来る。

圧縮導体撓線は比例限度が高く取扱い上剛性が大きく感ずるのは、  
一つにはこのためである。

オノ54図 圧縮導体の荷重－撓み特性



#### 8.4.2.3 捩り特性

捩り剛性測定値をオノ26表に示す。表の試料番号は前表のそれに対応する。

これによれば圧縮導体は線間々隙が減少し、摩擦が増大し、加工硬化もするが、外径が縮小され、また同方向擦で圧合がないため普通交互擦線よりも捩り剛性は少い。

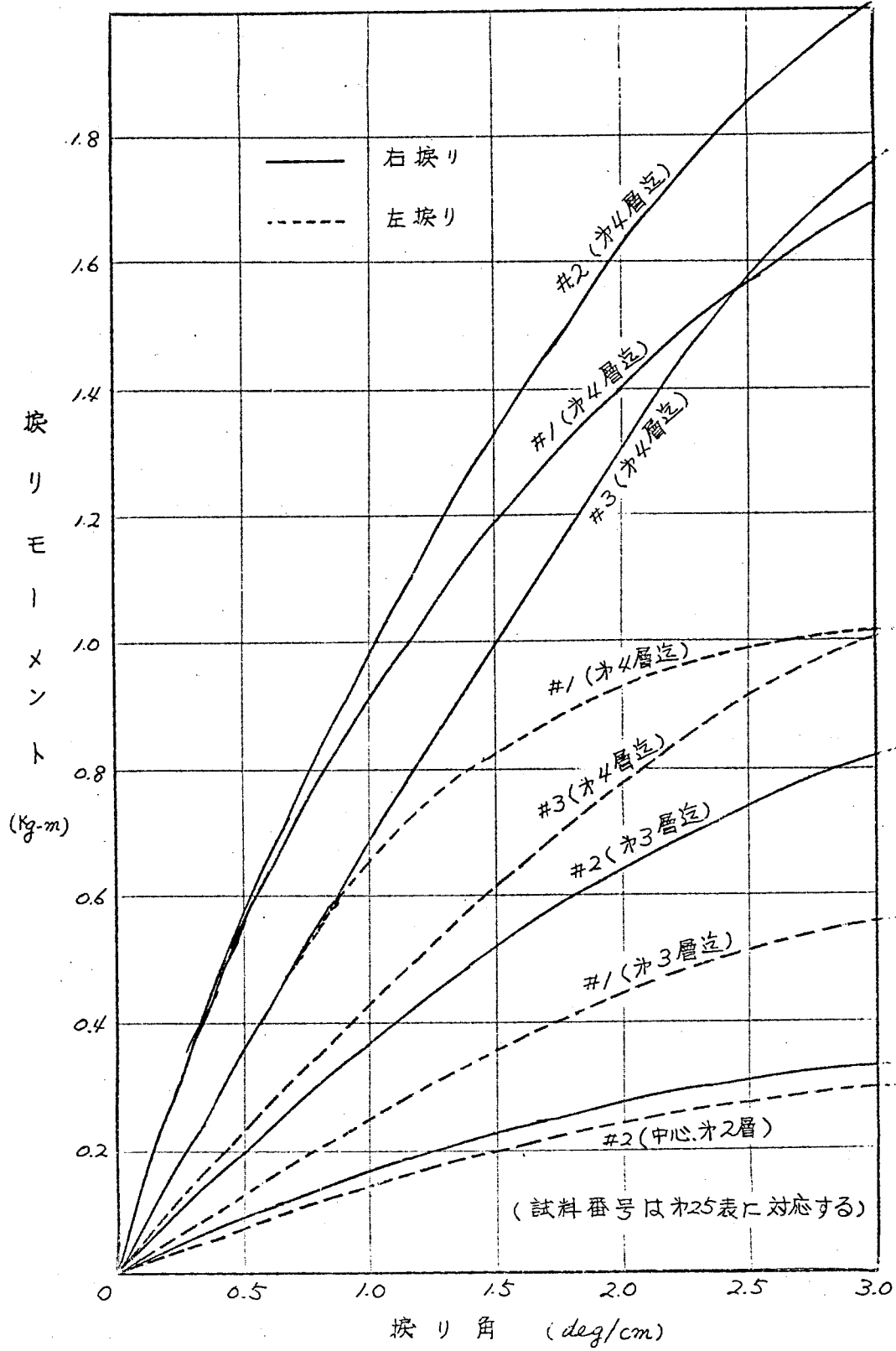
なお、圧縮導体では圧縮度が進むと捩り剛性が却って減る傾向を示した。これはある程度圧縮すれば摩擦の増大および加工硬化よりも断面積の減少が効いてくるためと思われるが、この傾向は曲げの場合も同様である。

オノ55図には捩りモーメント－捩り角特性を示す。中心およびオノ2層迄では普通導体より捩りモーメントは大きい。層数が増してオノ4層迄になると層同圧合がないので捩り角度の小さい範囲では



オ155図 圧縮専体の戻りモーメントー戻り角特性

150 mm<sup>2</sup> 同方向燃



普通交互捻よりも小さい値を示し、捻り角度が大になるにつれて普通交互捻に近い値となる。これは圧縮導体の比例限度が高いためである。

さらに層数の多いものでは層間圧合のある普通交互捻の方が大きいと考える。

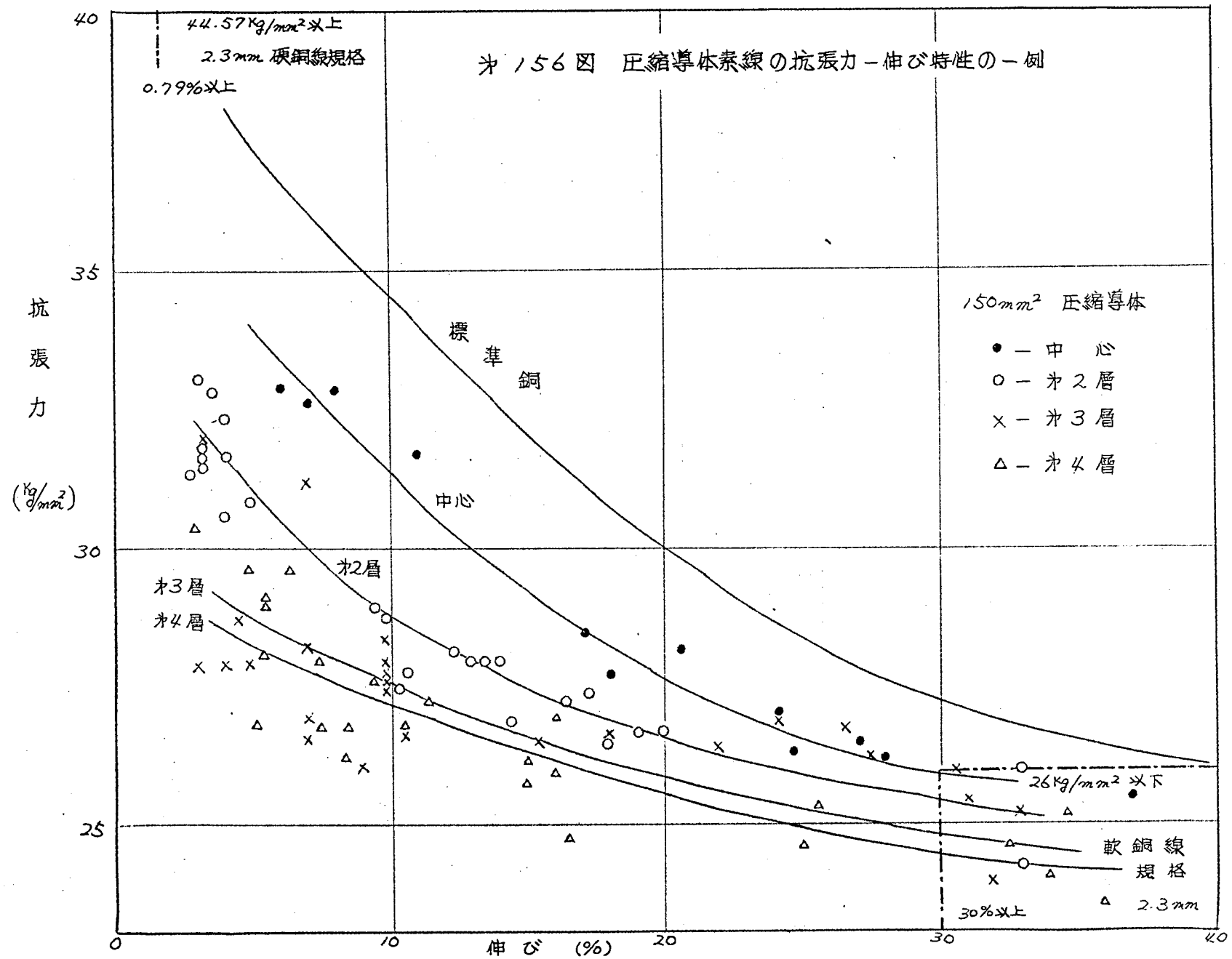
表 26 圧縮導体の捻り剛性測定値

	捻り方向	測定位置 (度)	捻り剛性測定値 (Kg-cm <sup>2</sup> )				
			# 1	# 2	# 3	普通交互捻	普通同方向
150 mm <sup>2</sup> 同方向 オ 4 層迄	右捻り	30	6.260	4.650	3.430	16.240	3.140
		100	—	4.722	3.540	16.840	3.240
	左捻り	30	3.420	—	2.734	4.560	3.330
		100	3.470	—	2.750	4.900	3.400
オ 3 層迄 (最外層を 取除く)	右捻り	30	—	2.130	—	1.558	2.260
		100	—	2.340	—	1.072	2.180
	左捻り	30	—	1.890	—	2.716	1.546
		100	—	—	—	3.220	1.406
中心および オ 2 層 (最外層および オ 3 層を 取除く)	右捻り	30	—	688	—	494	474
		100	—	774	—	774	—
	左捻り	30	—	678	—	416	396
		100	—	726	—	—	—

#### 8.4.2.4 素線および捻線の伸 抗張力

標準銅の伸と抗張力の関係はオ 156 図に図示する如く、ほぼ一定の関係にある。150 mm<sup>2</sup> 圧縮導体の数例につき素線の抗張力、伸の関係をこれにプロットして見た。

図によれば圧縮導体素線は圧縮前に比し抗張力は増し、伸びは低下する。その関係は標準銅の曲線より低い値を示す。当試料では中心より外層に行く程、この低下が著しいが、これは加工方法により一概には云えない。これらは構成素線の部分的加工率の変化(断面



積の不同)、加工後の形状および疵による。

つぎに燃線としての抗張力、伸を測定しカ27表に示す。

カ27表 圧縮燃線の強度

線 種		抗 張 力 (kg)	伸 (%)
普 通 燃 線		3744	32.0
圧縮燃線	# 1	3989	25.0
	# 2	4085	13.0
	# 3	4200	2.0

註一 試料番号はカ25表に対応す。

測定結果によれば圧縮度の増加にともない抗張力は僅かずつ増す。これは素線間接触面積の増加および加工硬化による影響の方が断面縮小および疵による素線抗張力の減少の影響より大きいためである。しかしながら伸びの低下は著るしいので、極度の圧縮は避けねばならぬ。

#### 8.4.3 セグメンタル素線燃り導体の特性 (70)(71)

セグメンタル素線燃り導体は外国において超高压ケーブルに相当数の実例があり、ドイツでは60 kV級にも多く用いられている。これは、カ157図の如く、あらかじめ成形せる素線を2層ないし3層燃合せ導体を形成するもので、占積率は圧縮導体の90%よりもさらに高く95%程度迄向上し、(単心のFケーブルは中空導体であるので圧縮導体とする事は困難である。) 表面の平滑化により電位傾度も緩和される特長がある。

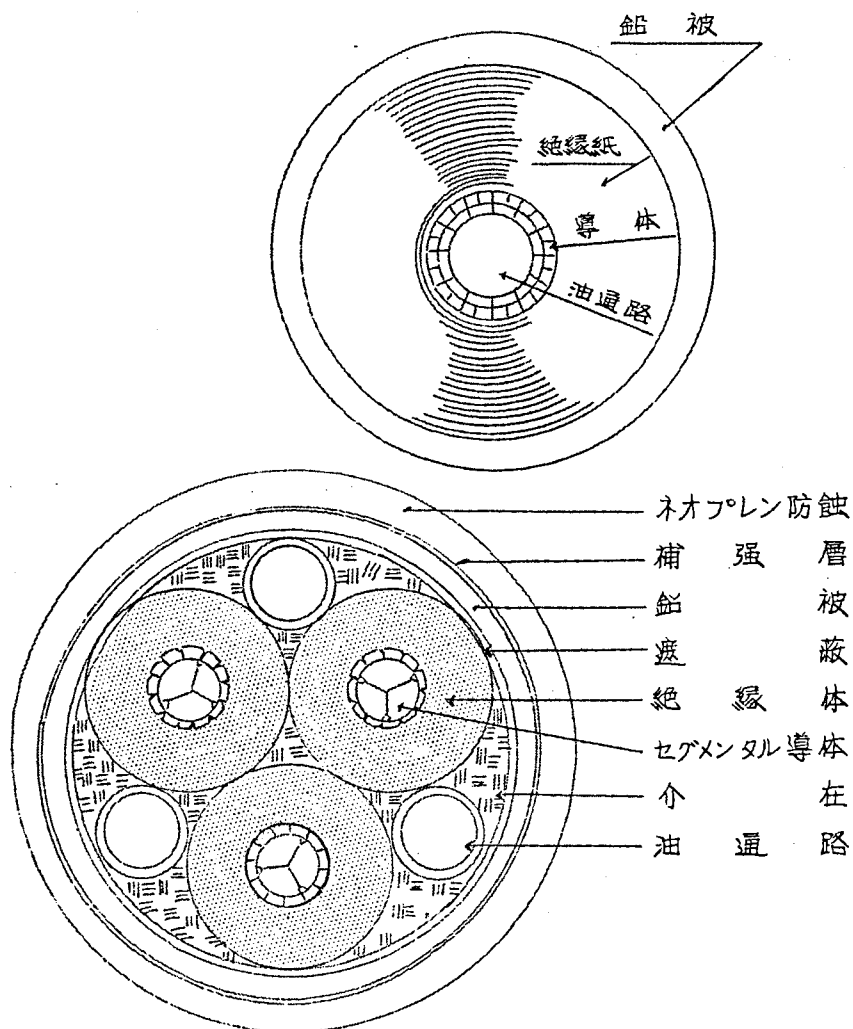
外径縮小の一例はカ28表に示すが、導体外径縮小による最大電位傾度の増大は表面の平滑さにより償つて余りあるので、超高压ケーブルに特に使用される。

国内ではセグメンタル素線燃り導体は導体の剛性を増し絶縁層に損傷

を与えるので、超高压ケーブルにも使用すべきでないといったことも

発表されているが、筆者等は各種のセグメンタル素線撚り導体を試作研究し、二、三、実用に供することができた。（国内には他に実例なし。）セグメンタル素線撚り導体はセグメンタルの形状を変えることにより特性は大きく変わるので一概には云えないが、表29の如く普通撚り導体に比し計算上（前項巻捲バネの集合体としての計算）はほぼ同等の曲げ剛さに設計できる<sup>しかし</sup>。実測では普通<sup>の増大</sup>直体の2～3倍の剛性を示した。これは占積率向上による線間摩擦によるものである。

図157 図 セグメンタル素線撚り導体を用いたケーブル



オ 28 表 外 径 比 較 表

線種	構 造	電 圧 (KV)	70	154	220
		導体サイズ (mm <sup>2</sup> )	400	200	200
普通導体	油通路孔径 (mm)		12.0	15.3	15.3
	撚線外径 (mm)		29.2	25.3	25.3
	紙巻外径 (mm)		45.2	53.3	69.3
	被鉛外径 (mm)		51.0	59.7	76.3
セグメンタル系撚り導体	油通路孔径 (mm)		12.0	15.3	15.3
	撚線外径 (mm)		25.8	22.5	22.5
	紙巻外径 (mm)		41.8	50.5	66.5
	被鉛外径 (mm)		47.6	56.9	73.5
外径縮少率 (%)			6.67	4.5	3.5

撓り剛さは測定数は少ないが、撚線（交互撚）の撓り剛性において圧合が大きな割合を占めて居ることから、普通撚線との違いは少ないものと考える。

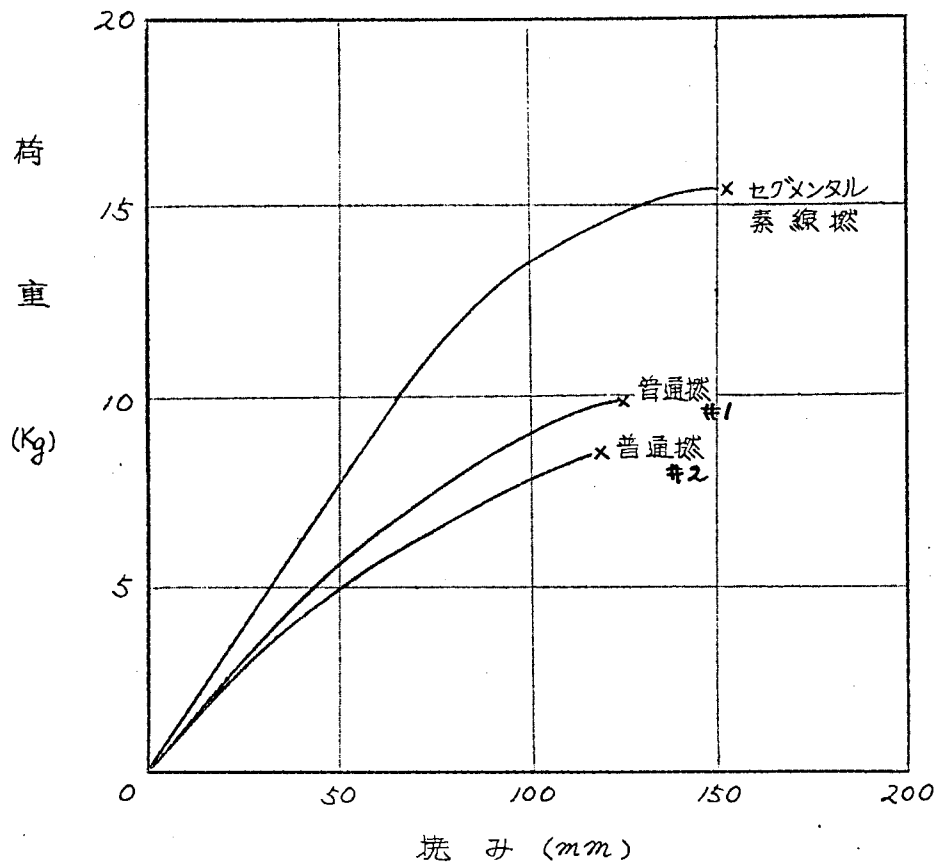
オ 29 表 セグメンタル系撚り導体の曲げ剛さおよび撓り剛さ

導体サイズ (mm <sup>2</sup> )			150	300	400 (中空)	280 (中空)
曲げ剛さ (kg-cm <sup>2</sup> )	普通導体	計 算	4765	11250	15650	—
		実 測	6350	—	24500	—
	セグメンタル導体	計 算	7645	10842	17780	32050
		実 測	20100	24600	35937	35740
撓り剛さ (kg-cm <sup>2</sup> )	普通導体	計 算	4092	10110	15800	—
		実 測	4460(左換) 16240(右換)	—	—	—
	セグメンタル導体	計 算	11697	16222	24420	21881
		実 測	—	—	—	18530(左換) 49100(右換)

また、前節と同じ集中荷重による撓みのテスト結果はオ 158 図の如くで、ズリ落ち点の変位によれば、セグメンタル系撚り導体は圧縮導体と同じく普通導体よりも比例限度が高い。

第158図 セグメンタル素線撚り導体の荷重-撓み特性

400mm<sup>2</sup> OFケーブル用導体



このようにセグメンタル素線撚り導体は普通導体より剛いが、後章に示す如くケーブルの他の構成に比すれば小さな値であり、また導体表面の凸凹による絶縁層の落ち込みはほとんどなくなるので、ケーブル曲が試験による導体直上絶縁層の紙切れの危険を著るしく減少する特長がある。筆者は最大電位傾度の減少よりもむしろこの点がセグメンタル導体の最も大きい長所であると考えている。従って超高圧ケーブル（特に薄紙を使用するもの）および大導体サイズのケーブルには今後も実用されることとなろう。

#### 8.4.4 結 言

本節は圧縮導体およびセグメンタル素線撚り導体採用の際、その機械的特性の低下を懸念されたのでその普及を円滑ならしめるため、その特性を研究したものである。圧縮導体では外径換算による可撓性は60~70%に低下するが、<sup>のため</sup>圧縮成型の曲げ剛性の値が大きくなる~~恐れ~~はない。撓り特性もほぼ同様である。しかし曲げ、撓りとも比例限度は高い。

なお、圧縮度の増加とともに素線としての抗張力は増大するが伸びが急激に低下するので、極度の圧縮は避けねばならない。

セグメンタル導体は曲げ剛性が普通導体に比し2~3倍大となり、また、比例限度も高い。しかし後章に示す如くケーブル全体に比すれば小さな値である。



## 第9章 電力紙ケーブルコアの機械的特性における各構成について

### 9.1 緒 言

電力紙ケーブルコアの機械的特性において各構成部分の果たす役割は今迄明らかでなく、たとえば油浸紙の如きは潤滑剤として無視して考えることさへあつた。本章は各構成毎に特性を調査することにより、その間の関係を明らかにすることを目的とした。

この研究においても筆者はケーブル・コアは捻線上に紙が捲かれ、その上に鉛被が施されるが、また、捻線スパイラルと紙円筒と鉛円筒との集合でもあると云う見方に終始して観察した。

### 9.2 各構成の曲げ剛性

一般的なSLケーブルに例をとり、10KV～30KVの絶縁厚のケーブルにつき各工程ごとに曲げ剛性EIを測定し、各前工程迄のEIとの差をとって捻線・油浸絶縁層、鉛被の曲げ剛性とした。これを表30表に示す。

表31表は油浸前後の捻線の曲げ剛性測定例であるが、測定の誤差範囲内であつてこれだけで変化すると考えることはできないが、表30表の各構成の表には油浸後の値をとつた。

表30表における各構成の曲げ剛性の値は絶縁層の捻線への喰込み、鉛被の締め等の影響があるから厳密ではないし、また、捻線構成(たとえば素線径の選定)、鉛被厚の選定が各線種でバランスがとれていないが、各構成の占める曲げ剛性の割合を知るには充分であろう。

すなわち、捻線 約 10%以下

絶縁層 約 25%以下

鉛被 約 70%以上

である。

表 30 各構成の曲げ剛さ

試料 番号	導体断面積 (mm <sup>2</sup> )	外 径 (mm)			曲 げ 剛 さ EI (kg-mm <sup>2</sup> )				各構成の占める割合 (%)		
		撚線	紙巻	被 鉛	撚線(油浸)	油浸絶縁紙	鉛 被	完 成 品 (被 鉛迄)	導 体	絶縁層	鉛 被
1	150	16.1	30.1	33.8	$6.58 \times 10^5$	$11.7 \times 10^6$	$3.25 \times 10^7$	$4.48 \times 10^7$	1.5	26.0	72.5
2	"	16.1	28.0	31.8	"	$4.29 \times 10^6$	$2.62 \times 10^7$	$3.11 \times 10^7$	2.1	13.7	84.2
3	"	16.1	23.5	26.5	"	$1.91 \times 10^6$	$1.26 \times 10^7$	$1.52 \times 10^7$	4.4	12.6	83.0
4	100	13.0	24.5	28.0	$5.32 \times 10^5$	$1.69 \times 10^6$	$1.65 \times 10^7$	$1.85 \times 10^7$	2.9	9.1	88.0
5	"	13.0	21.4	24.5	"	$1.59 \times 10^6$	$0.613 \times 10^7$	$0.825 \times 10^7$	6.4	19.3	74.3
6	38	7.8	16.3	18.8	$2.36 \times 10^5$	$0.314 \times 10^6$	$0.27 \times 10^7$	$0.325 \times 10^7$	7.3	9.7	83.0
7	"	7.8	14.0	17.2	"	$0.04 \times 10^6$	$0.253 \times 10^7$	$0.28 \times 10^7$	8.4	1.5	90.1

(測定温度 20~22°C)

表 31 油浸前後の撚線の曲げ剛さ

線 種	曲げ剛さ	撚 線 の EI (kg-mm <sup>2</sup> )	
		油 浸 前	油 浸 后
150 mm <sup>2</sup> (37/2.3)		$6.35 \times 10^5$	$6.58 \times 10^5$
100 mm <sup>2</sup> (19/2.6)		$5.33 \times 10^5$	$5.32 \times 10^5$
38 mm <sup>2</sup> (7/2.6)		$2.28 \times 10^5$	$2.36 \times 10^5$

つぎに60KV級および140KV級ケーブルの例として70KV  $1 \times 400^{mm^2}$  OFおよび140KV  $1 \times 600^{mm^2}$  OFでの測定結果をオ32表、オ33表に示す。(70)

燃線の占める割合はさらに少く剛性の大きなセグメンタル導体を用いても全体の曲げ剛性からは問題にならない。(71)

オ32表 70KV  $1 \times 400^{mm^2}$  OFケーブル各構成の曲げ剛さ

	外 径 (mm)			曲 げ 剛 性 EI (Kg-Cm <sup>2</sup> )				各構成の占める割合(%)		
	燃 線	紙 巻	鉛 被	燃 線	絶縁層	鉛 被	完 成 品 (被鉛位)	導 体	絶縁層	鉛 被
管 通 導 体	29.3	45.6	51.4	24500	808500	2252000	3085000	0.8	26.2	73.0
セグメンタル 系線燃り 導 体	27.2	43.5	49.5	35937	497063	2417000	2950000	1.22	16.8	82.0

オ33表 140KV  $1 \times 600^{mm^2}$  OFケーブル各構成の曲げ剛さ

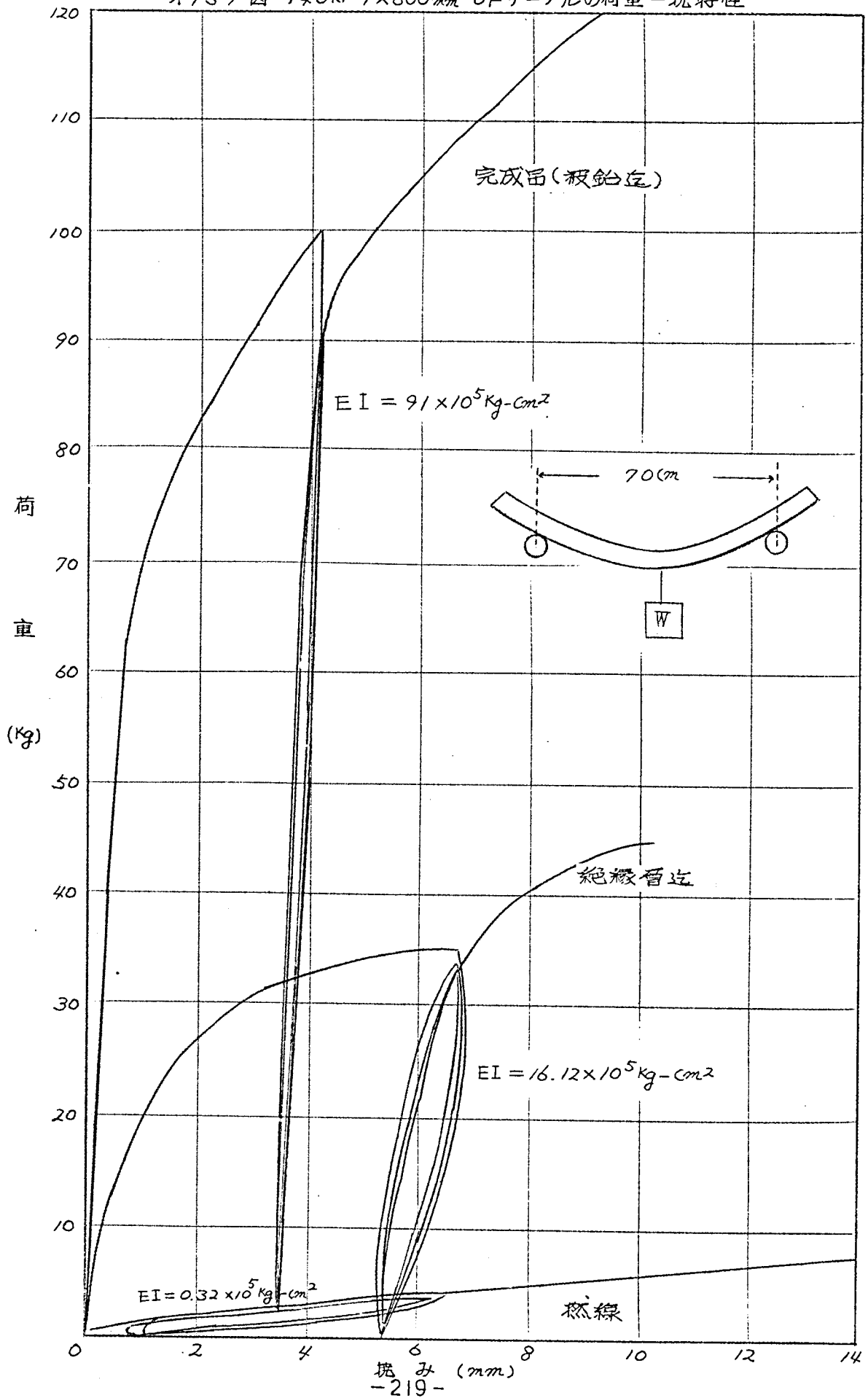
外 径 (mm)			曲 げ 剛 性 EI (Kg-Cm <sup>2</sup> )				各構成の占める割合(%)		
燃 線	紙 巻	鉛 被	燃 線	絶縁層	鉛 被	完 成 品 (被鉛位)	導 体	絶縁層	鉛 被
35.8	63.8	71.8	$0.32 \times 10^5$	$15.8 \times 10^5$	$74.7 \times 10^5$	$91 \times 10^5$	0.4	17.6	82

ケーブル導体の占める割合は今迄常識的に考えられていたよりも意外に少く、また絶縁層、鉛被の占める割合の大きいのは興味あることである。

なお、EIは弾性域の値ではあるが、大きな撓みをうけた時の各構成比較の基準にも充分なり得ることを示すために、オ33表の測定例の荷重-撓み特性をオ159図に掲げる。オ33表はこのため各構成とも支持間隔を等しくして測定した。

電力ケーブル燃線構成を決める場合の使用上の要素としては曲げ、捻り、膨脹伸縮、これらの絶縁層への影響等が考えられる。今迄この基準とされて

カ159 図 140KV 1×600mm<sup>2</sup> OFケーブルの荷重－撓特性



いたものは判然とせず経験的なものが多いが、主として曲げ剛さを対象にして各所要断面積を出すに好都合な素線数（JISでは $0.3\text{ mm}$ ごとに標準素線径を送んでいる）を送んで来たと考えてよいであらう。

たとえばJIS  $100\text{ mm}^2$ ,  $125\text{ mm}^2$ ,  $150\text{ mm}^2$ の構成および計算曲げ剛さは、

	構 成	計算曲げ剛さ ( $\text{Kg}\cdot\text{mm}^2$ )	実 測 ( $\text{Kg}\cdot\text{mm}^2$ )
$100\text{ mm}^2$	19/2.6	565000	533000
$125\text{ mm}^2$	19/2.9	875000	—
$150\text{ mm}^2$	37/2.3	675000	635000

（計算は§8-2の $(650 \times d^4 \times \text{素線数})\text{Kg}\cdot\text{mm}^2$ なる実用式による。）

であつてバランスのとれたものとは思われない。

上述のことより現在採用されている標準構成よりもっと単純な構成になし得る可能性のあることは明らかである。

国内にも単線を使用したケーブルの実例（古河社のもので $20\text{ KV } 60\text{ mm}^2\text{ SL}$ および $60\text{ KV } 10\text{ mm}\phi$  ( $78.5\text{ mm}^2$ ) DC海底線）があるが、たとえば $50\text{ mm}^2$ の導体はJIS規格では丸形 $19/1.8$ 、扇形 $14.0$   $15/1.8$ であるに対しV.D.E規格では単線を許している。

また、前記実測から逆算した鉛被のヤング率はバラツキは多いが平均 $1300\text{ Kg/mm}^2$ で一般に純鉛のヤング率として採用されてる値（ $1500 \sim 1600\text{ Kg/mm}^2$ ）より小さい値を示した。

これは、前述の如き方法で算出したので鉛被の締め、および、これにもとづく表面の凸凹、外径測定の誤差（油浸紙は軟かく鉛被は凸凹あり、ともに正確な測定はむずかしい）等によるものと思われる。

油浸紙の曲げのヤング率も同様算出して見た。これは紙捲時の含湿率、張力、等の要因多く、バラツキはさらに多いが、約 $100 \sim 300\text{ Kg/mm}^2$ であつた。

また、絶縁層の捻線による影響を見るため、 $30\text{ KV } 150\text{ mm}^2\text{ SL}$ ケーブルで生紙、油浸紙の両者について紙厚を減らしながらEIを測定し、各紙厚での絶縁平均曲げヤング率を算出した結果をオ160図に示す。

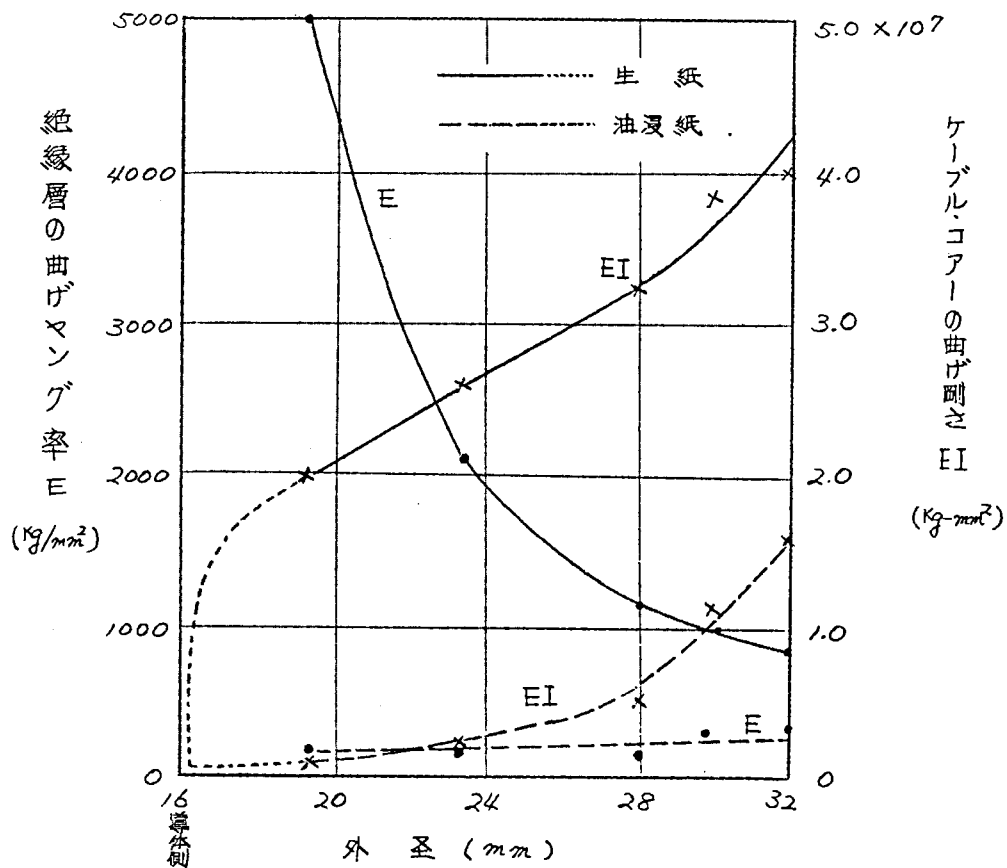
生紙の場合は捻線表面の凸凹部への喰い込みと各積層絶縁紙間隙の少いことから、捻線の曲げによる素線移動を制限するので、内層では見掛け上のヤング率が急激に高くなり、現象は複雑であるが、油浸紙の場合は捻線による影

響は少い。他のサイズの実測でもこれと同様な傾向を示した。

ケーブルコアのベンド試験において伸びおよび耐折畳強さが、ともに優る生紙の方が油浸紙より導体近傍で紙切れを生じ易いのは、主としてこの導体の影響によるものである。

なお、本章における試料の紙巻張力は $\phi 2$ 章、 $\phi 3$ 章の試料と同じく張力 $4 \sim 5 \text{ kg}/20 \text{ mm}$ のもので、最近の傾向よりは強い紙巻張力のものである。

$\phi 160$  図 生紙、油浸紙の曲げ剛さ比較



### 9.3 各構成の戻り特性

各構成ごとの戻り特性において占める割合を知るため、 $\phi 34$ 表のS.Lケーブルについて各工程毎に戻り試験を行った。

ケーブル燃合せは必ず右燃りであるので戻り方向は右戻りとした。実験においては $\phi 3$ 章3.3の紙円筒および $\phi 8$ 章8.3の燃線の戻り試験と同じく両端

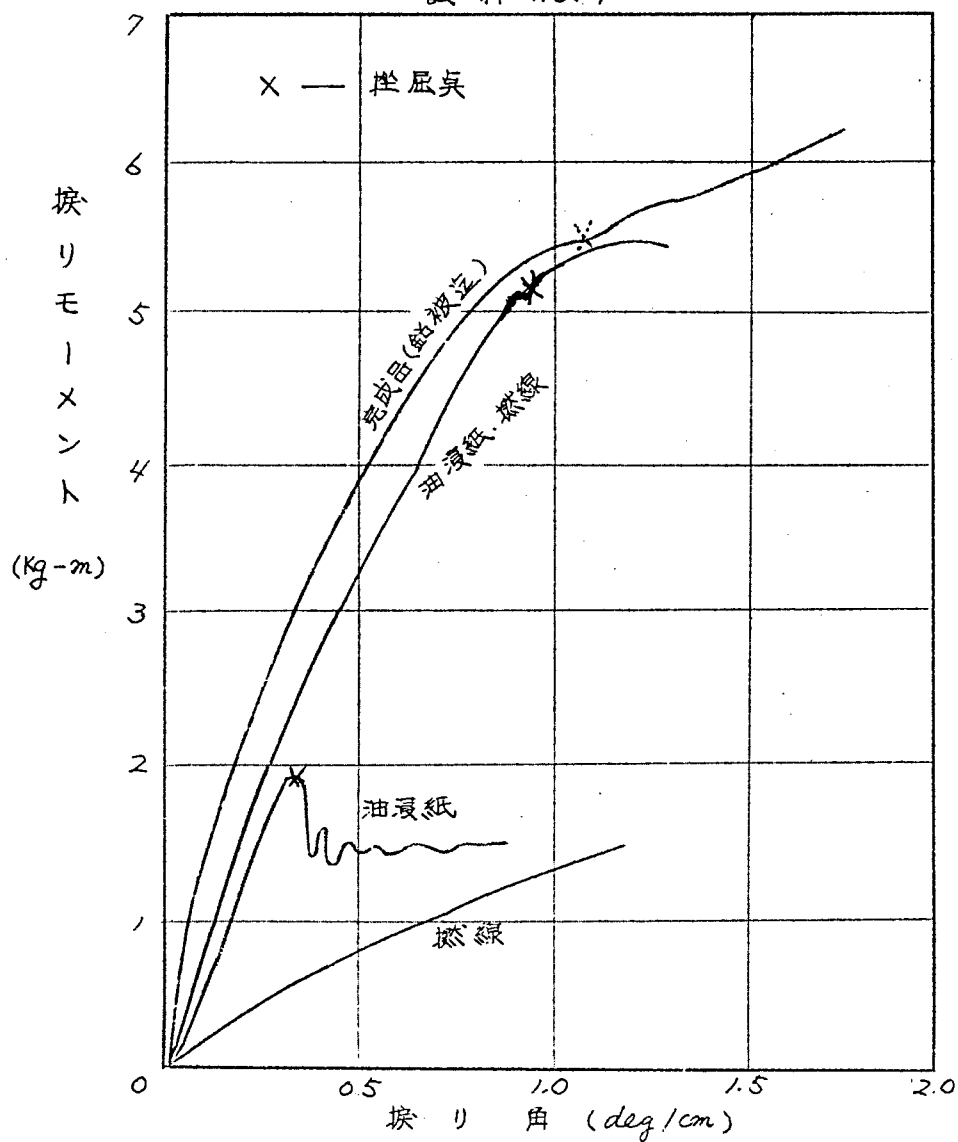
はウッド合金にて鑄込み、試料端末におけるすべりを防いだ。

調合したウッド合金は融点  $68^{\circ}\text{C}$  であり試料を傷つける恐れはない。

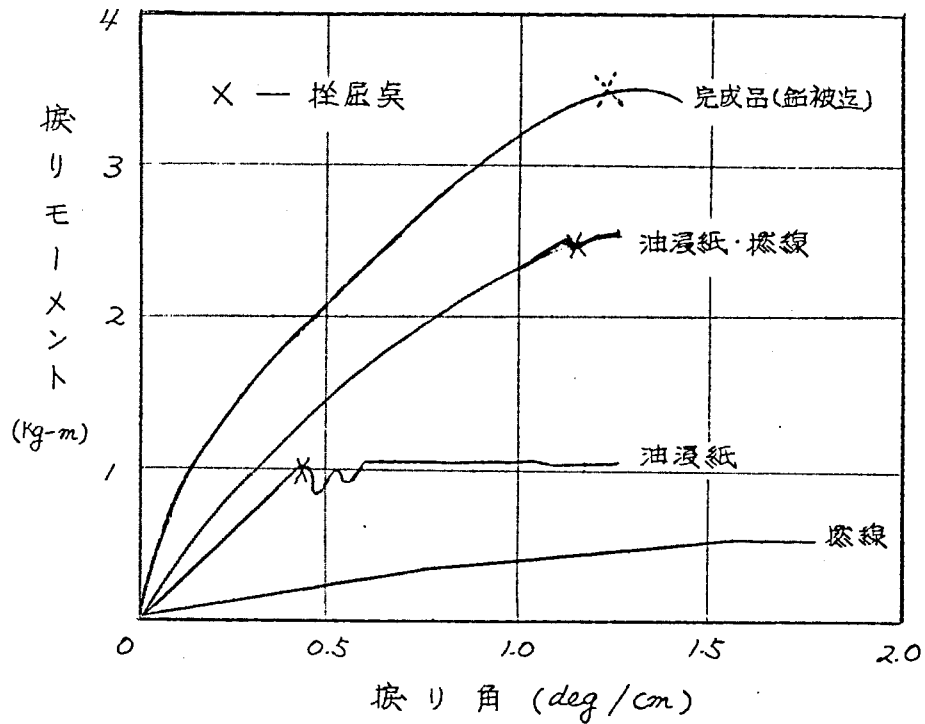
表 34 試料ケーブル構造表

試 料		No. 1	No. 2
燃 線	断面積 ( $\text{mm}^2$ )	150	80
	外 径 ( $\text{mm}$ )	16.1	10.0
油浸紙	厚 ( $\text{mm}$ )	5.3	5.7
	外 径 ( $\text{mm}$ )	26.8	21.8
被 鉛	厚 ( $\text{mm}$ )	2.1	2.1
	外 径 ( $\text{mm}$ )	31	26

図 16 各構成の埃リモーメント-埃リ角特性  
試 料 No. 1



オ162図 各構成の捩りモーメントー捩り角特性  
試料 No. 2



捩り試験における捩りモーメントー捩り角度特性をそれぞれオ161図、オ162図に示す。

この図により撚線、絶縁層、鉛被の捩り剛性がケーブルの捩り剛性において占める比率は、ほぼ、理解できるが、今迄に考えられていた以上に油浸紙の占める率は高い。

撚線は層間圧合、線間摩擦等で曲げの場合より占める割合は大きいが、サイズによつては、相当小さいものであることが分る。

#### 9.4 結 言

本章においてはケーブルの機械的特性における各構成の果たす役割について考察を行つた。

ケーブルの曲げにおいてはその曲げ剛さの大部分を鉛が占め、導体の占める割合は意外な程に少いことが判明した。



また、埃りにおいては油浸紙の占める割合が相当大的なものであり、導体は曲げの場合より多いが、サイズによつてはなお相当小さいものである。

これにより導体構成改良の基礎資料が得られた。また、今迄常識的に油浸絶縁層は潤滑剤であり、機械的特性の上では無視出来るとした説もあつたが、これの誤りであることを明らかにした。当研究は前章と共に特殊燃線の普及に当り、燃線の占める割合の小さなことを示しその採用を推奨することができた。

## オ10章 電力紙ケーブル絶縁層のスパイラルとしての性質について

### 10.1 緒 言

電力紙ケーブル絶縁層の筒としての性質は既にオ2章よりオ4章にわたって述べたが、ここでは絶縁層が持つところのスパイラルとしての性質について述べる。これにより複雑な紙ケーブルの機械的特性を理解するための参考としたい。

### 10.2 絶縁層のスパイラルとしての性質

絶縁層は元来螺旋状に纏捲せられた紙テープの集合体であるので当然スパイラルとしての性質を表わす。従つて曲げあるいは捻りを受けた場合個々の紙層はスパイラルの性質に従い相互に滑り合い、受ける応力を減ずるので紙テープの伸長率以上に曲げることができる。

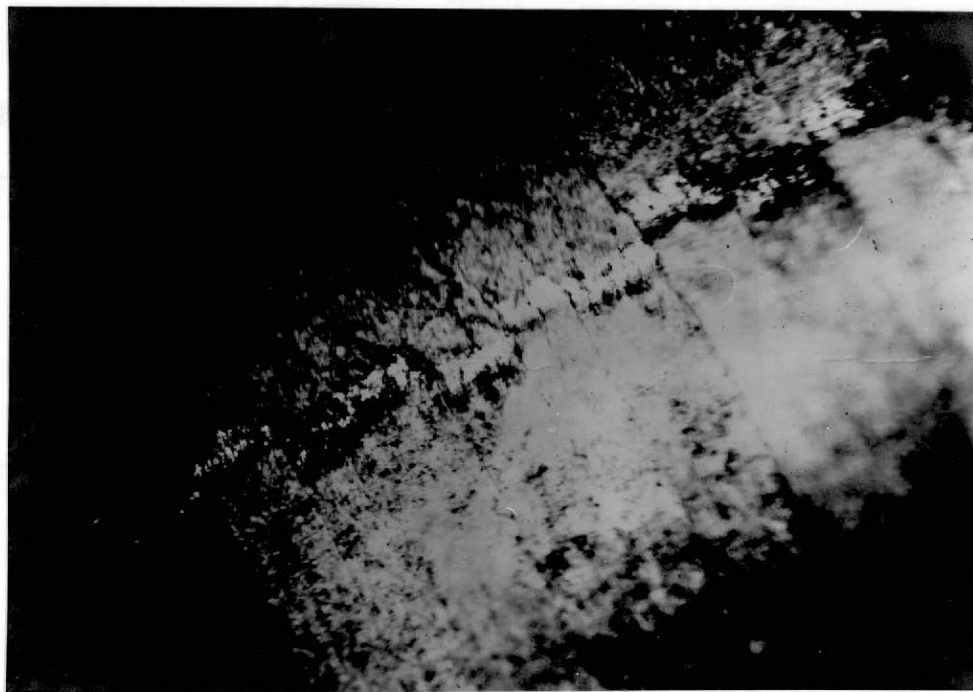
これは、紙テープ間の緊迫の度合により大きく左右され、極端にかたく捲かれた場合、あるいはソリッドケーブルでケーブル温度が非常に低い場合はスパイラルの性質を示すことができず、曲げ等により損傷を受ける。

乾燥工程は水分の減少により紙繊維を収縮せしめ絶縁層を非緊密化する効果がある。含浸後のケーブルで紙層相互の滑りが良い理由は、一般に云われているように含浸油が潤滑剤として働くためであるかどうかは筆者の実験では確められていない。むしろ後述の如く含浸により紙テープを軟かくし、見掛け上の摩擦係数を減ずる効果によると考える。

つぎに一般に紙捲では何枚かづつ交互捲することが多いが、これら紙層は乾燥される場合、収縮によりピッチ、ダイヤの小さくなる方向に移動する傾向を示しスパイラルとしての性質を示す。

オ163図は例として6枚交互捲のものに乾燥前ケーブル断面に鉛筆により筋を附し乾燥后撮影したもので、6枚づつの各層のずれが良く判別できる。<sup>(7)</sup>

### カノ63 図 紙 層 の 移 動 状 況



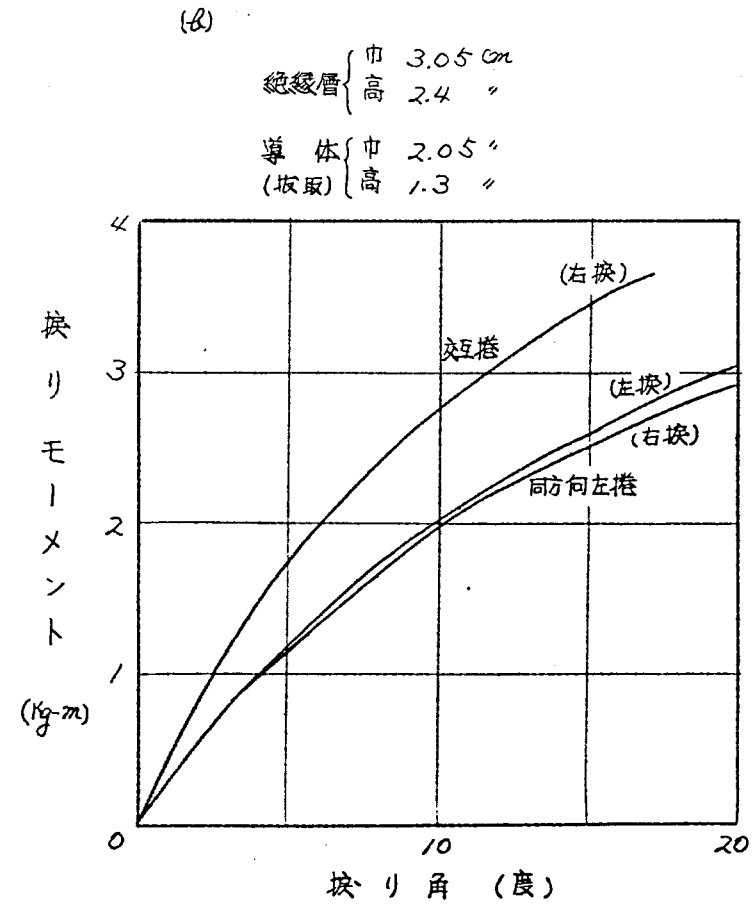
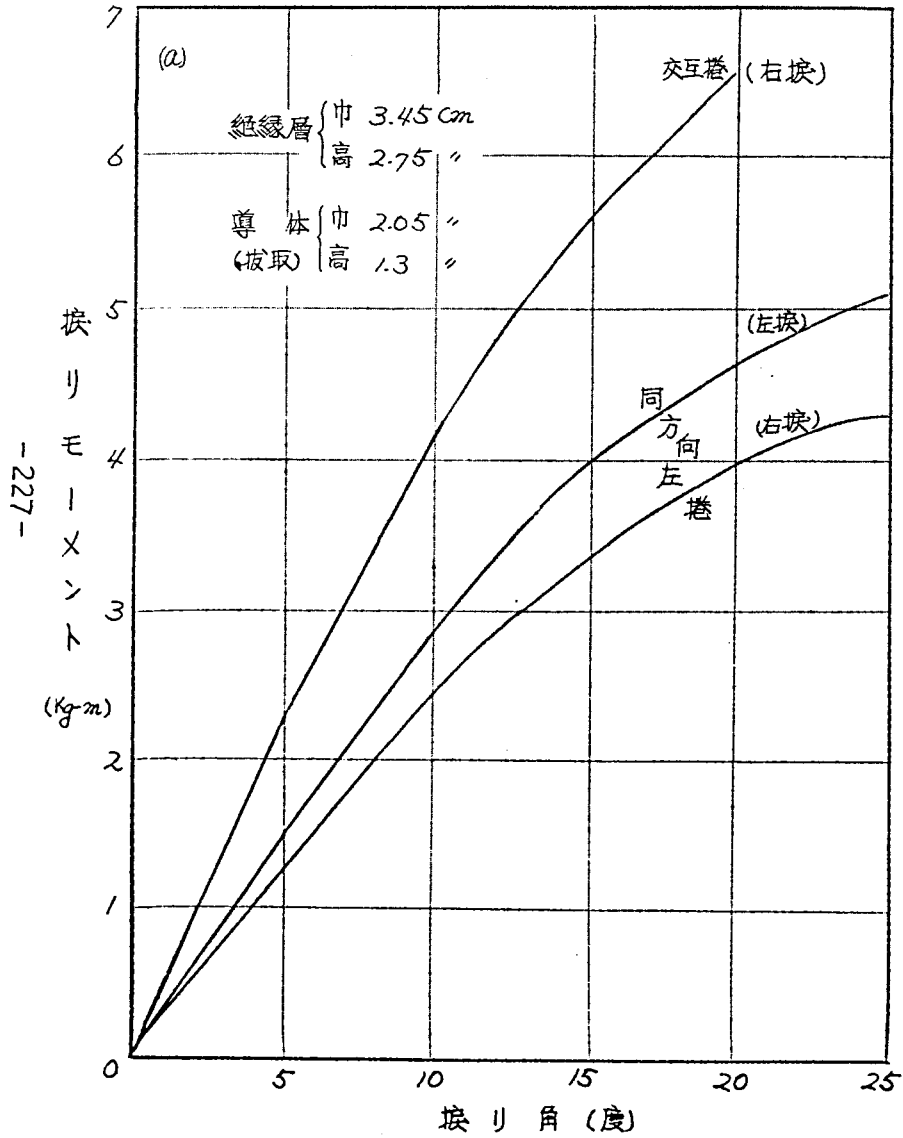
従つてこの様な傾向をもつ絶縁層の各層が挟りを受けた場合、撓線スパイラルと同じく交互捲きでは圧合によるモーメントが相当効いてくるはずである。

カノ64 図は交互捲および同方向捲における挟り角—挟りモーメント特性の比較例を示した。圧合のある交互捲は最も大きな挟りモーメントを示し、同方向捲では締められる方向のものが弛み方向挟りより大きい挟りモーメントを示した。

これは撓線における交互捲、同方向捲の挟り特性と全く同一の傾向であり、生紙の如く層向が緊密な一見均質な如き感じの絶縁層においてもスパイラルの性質を保有していることが分る。

油浸絶縁層では生紙の時にくらべスパイラルの性質が一層判然としてくる

※ 164 図 扇形生紙中空筒の換り特性



が、その最も良い例は換り挫屈における螺旋状挫屈皺の発生状況であろう。

生紙の場合の挫屈皺は内方変位（中空）外方変位（内部心有り）いずれの場合も層として挫屈する。油浸紙の場合（内部心線の有る場合）は、外部では生紙のそれに近く、内部になるに従い巻方向により大きな相違を示し、換りにより弛められる方向の紙層は上部の締めり方向の紙層に締められて~~／＼~~状の皺を生ずるが、締められる方向の紙層は全然異状を示さない。さらに鉛被を有する時はこの傾向は顕著で、極端な場合は弛められる紙層のみ紙切れを生ずる。これは螺旋スパイラルの層間圧合に相当するものである。

これと同様な事はキャンブリック電力ケーブルでも見られる。キャンブリックケーブルではテープ厚は紙テープより厚く、層数も少いが、積層条件が悪く、紙ケーブルよりも換り挫屈は顕著である。このケーブルでは積層条件を上げることが望めないが、層数が少いので巻方向の工夫により挫屈皺の程度もしくは、外觀を向上せしめることができる。

### 10.3 交互巻と同方向巻の比較<sup>(72)</sup>

電力紙ケーブルの紙巻方向を交互巻にすべきか、同方向巻にすべきかは古くから繰返し論ぜられたところで、最近の外国文献にもその得失が議論せられているが、未だ定説はない。

しかし一般には交互巻を採用するものが多く同方向巻を採用しているものは少い。

筆者が今迄に述べて来た実験では同方向巻および交互巻における曲げ挫屈歪および皺発生状況は変らなかつた。（オス章 2.3 参照）また、オス 5 表には当社における 30KV SL ケーブルの同方向巻、交互巻を比較した曲げテスト結果の一例を示すが、やはり差違は認められずこの試料では長時間破壊試験にも違いは見られなかつた。<sup>(72)</sup>

一方、換りにおいては、生紙の場合は交互巻、同方向巻に挫屈歪の違いは見

られなかったが、(オ4章4.3参照) 挟りモーメントは交互巻が大きく、集合スパイラルの特性を示し、油浸紙の場合は巻方向により紙層の挫屈皺発生状況は着るしい相違を示した。(オ3章3.3参照)

外国文献において同方向巻きを堆すものは交互巻きの巻方向の境において下層に皺を生じ、または損傷をあたえること、および境界面での油層ギマツプが大になることを挙げているが、一理あることで、不必要に多い巻方向変換は有害無益であらう。

オ35表 紙巻方向によるバンド、テスト結果比較

曲げ歪	巻方向	試料	紙巾の支 以下の切数	紙巾の支 以上の切数	全切
鉛20 被 外 歪 の	交互巻	1	1	0	0
		2	1	0	0
		3	0	0	0
	同方向巻	1	2	0	0
		2	2	0	0
		3	0	0	0
12 倍	交互巻	1	12	0	0
		2	4	0	0
	同方向巻	1	17	0	0
		2	40	0	0
8 倍	交互巻	1	704	0	0
		2	510	0	0
		3	187	12	0
	同方向巻	1	526	2	0
		2	568	1	0
		3	670	1	0
6 倍	交互巻	1	917	29	3
		2	836	42	0
	同方向巻	1	931	24	1
		2	845	22	1

- 註 1. 30KV 150mm<sup>2</sup> SL  
 2. 紙厚 2.5mm 鉛被 2.0mm  
 3. 交互巻 6枚交互 重なり寸 ギマツプ 0.5~1.0mm  
 同方向巻 一 " "  
 4. 曲げ試験 往復2回

しかし、紙捲収束の安定性、接続部紙捲収束における得失、また、同方向捲における紙巾の変る際の油層ギャップの増大等は交互捲の方が有利である。

以上同方向捲は換りにおいては多少の違いはあるが、ケーブル取扱の主要素である曲げについては交互捲と同様な特性を示すので、筆者は他の得失を考慮して適当回数の交互捲が有利であると考える。

#### 10.4 結 言

絶縁層はパイプとしての性質をもつが、またスパイラルとしての性質も保有しているので、これについて説明を行い絶縁層の特性を理解する一助とした。たとえば絶縁層の換りモーメントの如きも同方向捲、交互捲いずれも燃線の場合と全く対応する。また、古くから論ぜられている紙捲の交互捲と同方向捲の優劣は換り特性では多少の差があるが曲げ特性はほぼ、同じであり、他の面を考慮することにより交互捲きが良いと考える。

## 第11章 スパイラル構造の曲げによる素線移動に関する問題について<sup>(73)</sup>

### 11.1 結 言

スパイラル構造は元々曲げによる素線の移動を前提として採用されており、これによつて曲げた場合の素線歪を減少し、許容曲げ範囲を増加することとなる。

この素線移動は曲げのほか、捻り、横圧等に対しても重要な要素であるが、他のスパイラル工業製品では素線移動が直接障害を起すことはないので、素線歪と関連して扱われている程度にすぎない。

電力紙ケーブルでは導体スパイラルの如く外部に他の構造をもち、これによつて動きを拘束されるとか、絶縁層スパイラルの如く各紙テープ間の接触の度合いが強く紙テープスパイラルの移動のさまたげとなる等、特有のスパイラル構造を有している。

先に第8章においてパイプ構造（等方性鉛パイプ、積層絶縁層パイプ）の挫屈が繰返し曲げによる変形によつて影響されることに触れたが、上述の如きスパイラル構造も曲げの繰返しにより支障を起す。その主なるものはケーブルのうねり（または蛇行曲り）、紙切れ、紙皺である。

紙切れ、紙皺のケーブルに与える障害については先に説明したが、うねりもまた、これに劣らず大きな問題である。うねりはケーブルでしばしば起り、製造または布設の遂行を不可能にすることがある。

電力紙ケーブルでは特に単心のケーブル被鉛時に起りやすく、鉛被に蛇腹を生じたり、鉛被下に空隙を生じてケーブルの耐電圧値を下げる。

繰返し曲げにおける、うねり、紙切れ、紙皺は絶縁層に絶縁油が含浸された後に発生を見ることは比較的少なく、またケーブル絶縁油含浸前における曲げは1～2回にすぎないので、以下本章は曲げ戻しの問題を主体として考察を進めることとした。

註一 電力紙ケーブルには多心ケーブルの、うねりの如く本章で扱うものと全く別の原因によるうねりもある。

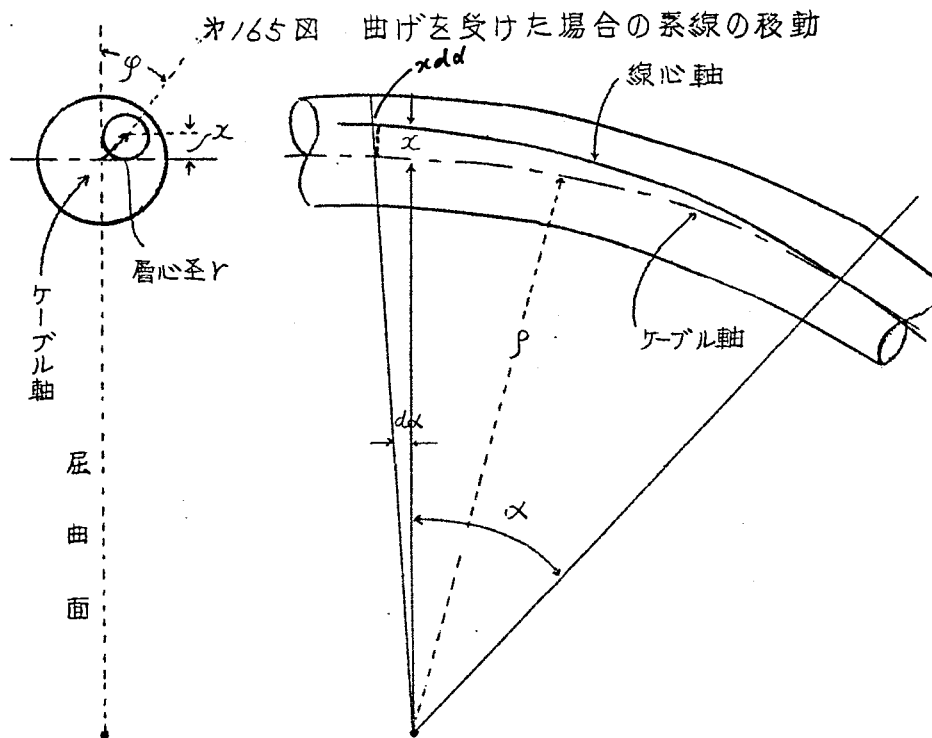


## 11.2 スパイラル素線の曲げによる移動量<sup>(74)</sup>

ケーブル界ではこの移動量のみについては幸い古くから研究されており、種々の仮定を用いて二、三の計算式が提案されている。

Emanueli 氏によるものはケーブル・コアの相対的移動量を研究するため行ったもので、最も簡単な表式であらわされ、厳密なものではないが、他の計算式とほぼ同様な値を与え、かつ、実験値にも近いので、これにつき紹介する。

(74)



カ/65図において半径  $\rho$  なる円弧に沿って曲げられた場合軸の長さを弯曲前と同一と仮定する。ケーブル軸から  $x$  にあり、かつ、軸の長さ  $\rho d\alpha$  に対応する線分の長さは、弯曲后さらに長くならねばならぬが、この増加が不可能であれば  $x d\alpha$  だけ移動することとなる。

また、一般に

$$x = r \cos \varphi$$

$$\frac{\varphi}{\rho \alpha} = \frac{2\pi}{p} \quad \text{こゝに } p \text{ はピッチ}$$

$$\therefore \varphi = 2\pi \rho \alpha / p$$

$$\text{微小移動量 } d\lambda = x d\alpha = r \cos \varphi d\alpha$$

$$= r \cos \left( \frac{2\pi p \alpha}{p} \right) d\alpha$$

角 $\alpha$ に対する線心長の全移動量は

$$\therefore \lambda = \left[ \frac{r p}{2\pi p} \sin \frac{2\pi p \alpha}{p} \right]_0^\alpha = \frac{r p}{2\pi p} \sin \varphi$$

従つて線心移動量最大値は

$$\lambda_{max} = \frac{r p}{2\pi p} \text{ となる.}$$

この値と実験値との比較は表36に示す如くである。

表36 曲げによるスパイラルの移動量

試料番号		No. 1	No. 2	No. 3
ピッチ $p$ (mm)		810	770	700
曲げ半径 $\rho$ (mm)		310	310	520
ケーブル管心半径 $r$ (mm)		25.2	21.4	15
最大移動量 (mm)	計算値	10.4	8.4	3.21
	実測値	10.0	7.0	2.9

(1) および (2) は帯絶縁紙のあるまゝの状態にて曲げた超多心ケーブルの例  
(51) (52) 3 は紙ケーブル導体の例 (52) 実測値は外用に沿ひ線心軸に直角に引いた線条の最大変位を測定

計算値は実測値より約5%大であるが、外部絶縁の存在にかゝらず曲げにおけるスパイラル素線の移動はほぼ支障なく行われることを示している。

### 11.3 撚線スパイラルの曲げ戻しの問題<sup>(73)</sup>

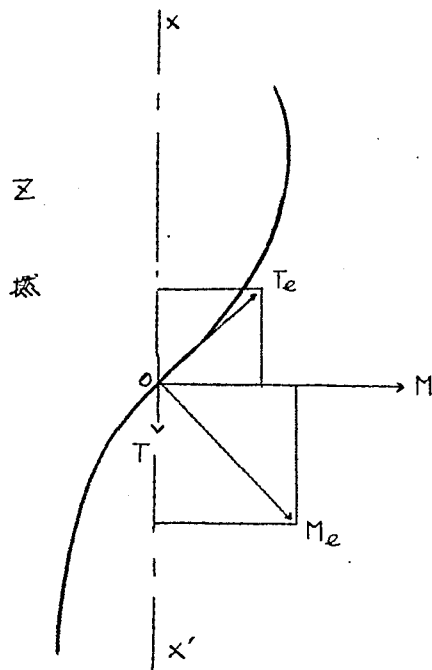
電力紙ケーブルにおける撚線スパイラルの曲げ戻しによる最も大きな問題はうねり（または蛇行曲り）であろう。

スパイラル構造は、それ自体異方性であつて、内部応力によりうねりが発生しやすく、また外力を受けた場合にも荷重形式と直接変形様式との関係が複雑である。

さらに電力紙ケーブルは架空線の如き裸撚線と異り撚線外部構造との関係も考慮されねばならず、外部絶縁層と関連して、複雑なうねりを発生する。

これについての理解を助ける意味で、まづ裸撚線のうねりについて説明する。この場合は比較的簡単でつぎの如く考えられている。(76)

第166図 裸撚線の素線スパイラルに働くモーメント



第166図において(Σ撚とす)

$T_e$ ..... 弾性復帰捩りモーメント

$M_e$ ..... 弾性復帰曲げモーメント

とすれば、この  $T_e$  は撚線時の素線の捩り方向モーメントと撚戻しに要するモーメントにより生じ、 $M_e$  は撚線時の素線の曲げ方向モーメントにより生ずる。この両者のモーメントの軸線方向のベクトル和は  $T$  の捩りモーメントとなり、それに直角方向のベクトル和は  $M$  なる曲げモーメントとなる。

各素線の  $M$  なる曲げモーメントはたがいに、バランスをとり外見上軸線を曲げる作用を生じない。これに反し  $T$  なる捩りモーメントは素線数倍となり、撚線に捩り変形を与えんとする。

このモーメントと巻取ドラムでの変形とにより、コイル状変形を生じ、うねりとなる。

従つて  $M_e$ 、 $T_e$  の大きさの比および  $T_e$  の方向(撚戻しの大小)によつて逆方向うねりをも生ずることとなる。

一般の撚返しは1回転につき1回であるから、 $T_e$  は図の方向のベクトルとなり(ただし、Σ撚の時)、かつ、普通  $M_e > T_e$  であるから、 $T$  なる捩りモーメントは弛み方向に働く。S撚の場合は  $T$  の方向のみ逆向きとなり  $M$  の方向は変らない。

簡単なる例として最近普及を認めているアルミ線6本、鋼線1本の小サイズACSRの場合についてのべる。この場合、一般の燃返しを採用するならば弛み方向に抜ろうとする。<sup>又燃りの場合</sup>従つて中心鋼線は又方向捲ぐせのものを採用する方がうねりが少く、また、逆にS方向の時は大きなうねりを生ずる筈で、このことは最近の学会にも発表されている。

また、ドラム巻は曲げ変形をへらす意味においてのみ大きなものを用うることが有利である。

電力紙ケーブルの場合は軟鋼線を用いるので、その弾性復帰曲げモーメントおよび弾性復帰捩りモーメントは小さく、これにより上述の如くケーブルをうねらせるだけの力は生じない。

従つて電力紙ケーブル導体が裸燃線である場合には、特殊の場合を除きうねりを生ずることはないと言つて差支えない。

しかるに、これに絶縁層を加えた時はしばしばうねりを発生する。この原因については各種の説があり、定説がなかつたが、筆者は極めて単純な考え方からその原因を検討した。すなわちケーブルのうねりは前項に説明した曲げに際しての素線の移動が、ケーブルを元にもどした時元の位置に戻らないことによるとするものである。

また、超多心ケーブル等に見られる曲げ戻し時の素線の局所曲り（圧縮挫屈）の現象もうねりと全く同一のものであると考えられる。

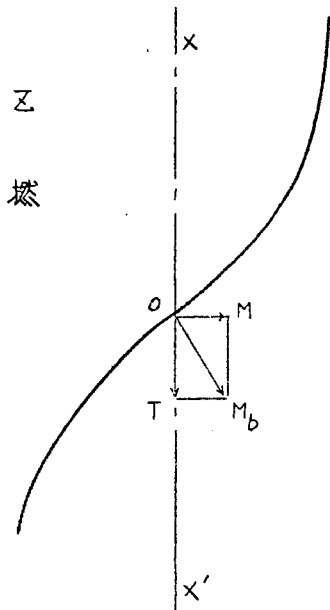
多層同心燃りにおいて、曲げ戻しの際、外部構造物の抑制力、線間摩擦等により元の位置に戻りがたい場合、素線曲率半径を大ならしめる如くピッチの弛む方向に抜れて補償しようとする。これがうねりの力を生ずる主原因となると考えられるのであって、多層燃の場合、最外層は移動量が多いので補償すべき長さも大きく、かつ、<sup>端末自由なる時は</sup>本数も多く、<sup>又</sup>うねり方向は最外層の弛む方向となる。（オノノ図参照）

および端未支持条件に

この場合素線の剛性とケーブル全体の剛性、重量等の関係よりケーブル全体をうねらすことのできない場合は、曲げ戻し時ケーブルの蛇行曲りを生じ、（戻りモーメントの比較的小さい時）あるいは各素線の圧縮歪屈による変形を生ずる。通信ケーブルの曲り、超多心ケーブルの折れ曲り、ならびにこれによる帯絶縁層の裂傷等はこれであると考えられる。

このうねりの原因となる作用力を裸線の時にならって簡単に解析すればつぎの如くである。

オノ67 図 ケーブル曲げ戻し時に  
作用するモーメント



オノ67 図において、曲げにより移動した素線が元に戻り難い場合、 $M_b$ なるモーメントが素線曲率半径を大ならしめるように働いて補償しようとする。この軸線方向ベクトルは  $T$  なる戻りモーメントとなり、軸線に直角方向のベクトルは  $M$  なる曲げモーメントとなる。

この曲げモーメントは前記、裸線の場合と異なり、主としてケーブルの曲げの外側部分にのみ多く働くから、各素線のモーメントは平衡せず軸線を曲

げる方向に働き、これはケーブルの元の捲取り変形を助長させることとなる。

これが前記戻りモーメント  $T$ （素線数倍となつて働く）に加わりケーブルにコイル状変形を生じ、うねりとなると考えられる。

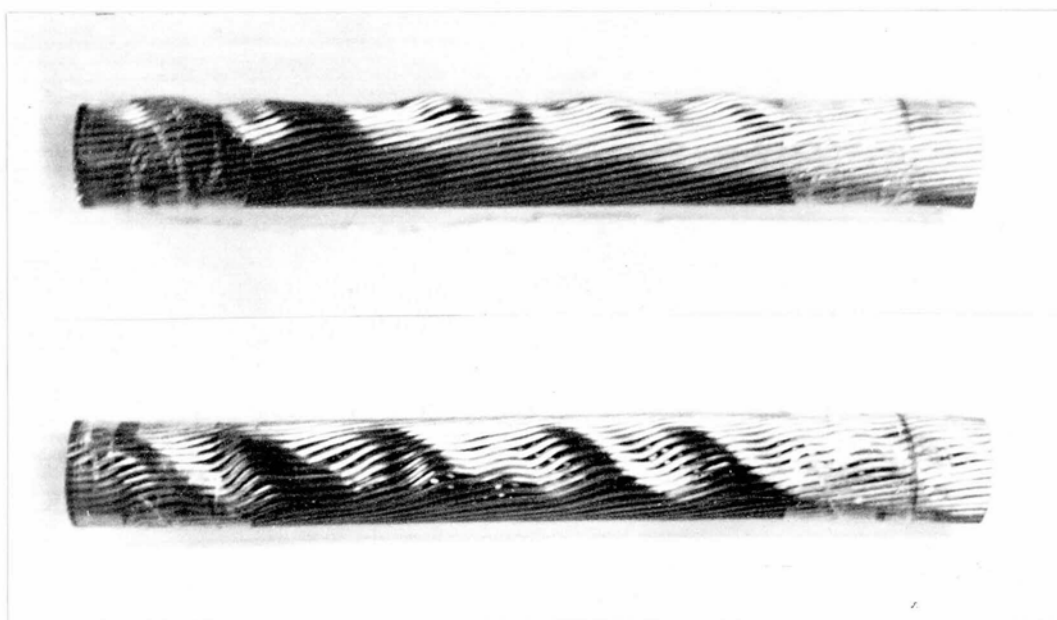
前述の如くうねり（または蛇行曲り）も素線の圧縮歪屈も元来同じものであると考えられ、うねりを生じ易いケーブルを戻れを防止しながら曲げ戻しを行えば、

ケーブルの蛇行曲り、あるいは、素線の圧縮歪屈を出現させることができる。

たとえば最外層ピッチを長くした（ピッチ 510 mm）60 KV  $1 \times 600 \text{ mm}^2$

OFケーブルを乾燥紙の状態で挟みをとめながら、10 倍の片側曲げテストを行つたところ、曲げの外側において鮮やかな素線の圧縮挫屈を生ぜしめ得た。これを超多心ケーブルの素線の圧縮挫屈と比較して示す。(※168 図 ※169 図)

※168 図 曲げ戻しによるOFケーブル導体の変形



※169 図 曲げ戻しによる超多心ケーブルの変形



従つてケーブルの場合のうねりをへらすためには

1. 曲げによる移動量をへらすこと。
2. 素線間および各層間の摩擦をへらし、曲げ戻しの際元に戻りやすくすること。
3. 外部絶縁物の拘束力を減じ、曲げ戻しやすくすること。

の三者が有効である。

1. に対しては前項の計算式に従えばできるだけ大きな半径に巻取り、ピッチも適当に小さくすることが効果がある。また、ピッチ・ダイヤ大なるものは不利である。

2. は電力紙ケーブルの場合は捻線時の張力以外に変化させることは難かしく、実際に採用しうる範囲の張力では効果は期待できない。

3. も電力紙ケーブルでは難かしい問題である。オノ69 図の素線圧縮歪屈も乾紙のみに生じ、生紙および油浸紙の実験では生じないことから考えて、外部構造との関連は重要な問題である。なお、単心 OF ケーブルが他の単心太物ケーブルに比してうねり易いのはこの外部構造との関連（OF ケーブルのみは乾紙で被鉛する）に主原因があり、一般に云われている如く油通路スパイラルの限界ピッチの差によることは少いと考えられる。事実、筆者の実験では油通路のない標準構成  $1000\text{ mm}^2$  ケーブル（ $127/3.2\text{ mm}$  紙厚  $7.0\text{ mm}$ 、最外層ピッチはピッチダイヤの12倍）を乾紙状態で被鉛して同様なうねりを現出せしめ得た。

以上筆者の考察によりうねりの原因については検討したが、うねりを止める具体的方法については未だ研究すべき問題は多く、これは後日にゆずりたい。

つぎに上記考察が他の通信ケーブル、コントロールケーブル等の同心撚ケーブルにも適用されることの例として61 心 PVC コントロールケーブルの例について述べる。

オノフの図に示す如く、布設時大きなうねりを生じ、不良処分としたケーブルを、ピッチを詰めて移動量を減じ、かつ線間に滑材を入れ、押へテープおよび外部被覆をゆるめ、曲げによる移動が元に戻り易いように処置を行ったことによりうねりを解決し得た。また、このケーブルでうねりを是正せんとした場合、オノ68図、オノ69図と同様な素線の圧縮挫屈による凹凸変形を生じた。

なお、当ケーブル（不良分）においてオノ2層（6本）、オノ4層（18本）の素線に曲りが生じて各上層にくいこんだ現象があつたが、これはオノ2層、オノ4層は最外層（オノ5層24本）と逆方向撚りであるため、大きなうねりによりこの層は逆にしまり、かえつて極端な素線の圧縮挫屈を起したものであると考えられる。

コントロールケーブルで導体に単線の代りに撚線を用いたり、また絶縁層にPVCよりも摩擦係数の小さいポリエチレンを採用すること等は上述のことからうねり防止に有効である。

オノフの図 P.V.C コントロールケーブルのうねり

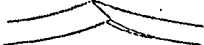




#### 11.4 スパイラル素線の圧縮挫屈について

性質の

前節には曲げ戻しによつて生じる素線の圧縮挫屈が、うねりと同じものであることを説明した。この素線圧縮挫屈は、比較的剛い材料の素線の場合に、曲げを受けて素線はほぼ支障なく移動を行うが、これを戻した場合元に戻り難い時に生じる。従つてその変形は曲げの外側におきる。

このやうな素線圧縮挫屈は丸素線よりなるスパイラル構造に限らず金風テープでも同様であつて、たとえば、ケーブルの縦補強帯の如く長ピッチの金風テープも極端な曲げ戻しにより、の如き圧縮挫屈変形を生ずる。

これに対し、比較的軟かい材料、たとえばケーブル介在用紙紐の如きものにあつては曲げた場合の素線移動は、困難であり、曲げの内側に圧縮挫屈による局所曲り変形を生ずる。時には介圧ジュートでさえこの可能性がある。これを防止するには前節に述べたうねりおよび曲げの外側にできる圧縮挫屈の場合と全く同じく

1. 曲げの移動量をへらすこと — 曲げ半径を大きくし、撓合ピッチを減ずる。
2. 曲げによる移動を行いやすくすること — 素線間の摩擦および外部構造物の拘束力をへらす。

が有効である。このやうに電力紙ケーブルに使用される各スパイラル構造は、いずれもスパイラルとしての基本性質にもとづいた動作を行うから、これに生じる問題は他のスパイラル構造の問題と関連して考えうる。このやうな考察方法により電力紙ケーブル以外のケーブルのうねりおよび素線圧縮挫屈にも同一の対策を応用し得ている。

### 11.5 絶縁層の曲げ戻しの問題

前章に示す如く紙絶縁層もスパイラルの性質を保有するので撚線同様曲げに際して紙テープは相互にすべり合う。

滑り合う機構は撚線と異なり複雑であり、曲げ戻しの際、生紙、乾紙、油浸紙により大きな違いを生ずる。

たとえば 60KV / X 600mm<sup>2</sup> OF ケーブルの 10 倍バンドにおける曲げ戻し時の状況は ヲノフノ 図に示す如くである。

ヲノフノ 図 絶縁層の曲げ戻し状況

各写真ケーブルの下側が曲げの内側

生  
紙



乾  
紙



油  
浸  
紙



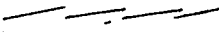

乾紙の場合には特に曲げの外側において紙帯が元の位置にもどり難く、挫屈皺を生じやすい。この挫屈皺はもちろんオス章に説明した如くパイプの挫屈でもあるが、また、一方前項におけるスパイラル素線の圧縮挫屈に類似した原因にもとづくものと考え得る。油浸紙の場合は紙間の移動および復帰が支障なく行われ皺は生じにくい。従つて特に乾紙状態における繰返し曲げは後述の紙切れの問題もあり出来るだけ避けねばならない。

つぎに絶縁層の曲げ戻しに関連の深いものとして絶縁紙テープの破断の問題について簡単に触れる。

絶縁層のケーブル屈曲時における紙テープの切断はケーブル機械的特性の最も重要なものの一つである。これは紙巻張力、導体のサイズ形状、絶縁紙の乾燥度、紙厚等多くの要素が関係しており、また、これらについての研究は外部発表を好まない性質のものであるので、単なる絶縁紙自体の強度に関する報告があるのみである。

筆者はこの機構についても新しい考えをもっているので、その考え方のみを紹介しておきたい。

筆者は紙の切断は張力によるよりも圧縮時(曲げの内側または伸ばす時の外側)個々の紙の挫屈皺部(主に下層テープのギヤツプの落ちこみに沿ったもの)に剪断力が働くことによる方が多いと考えている。もちろん、この挫屈により受けた損傷がつぎに張力を受けて切断に至ることもある。

切断せる紙テープは連続的に切れておらず、必ず  の如き紙切部のつながりからなり、そのような紙切を生じ易い部分には下層テープの gap に沿つて  の如き連続した細長い挫屈皺が見られる。

絶縁層は乾紙、生紙、油浸紙の順に紙切れを生じやすいが、これらを各紙片の状態で比較した一例はオ37表の如くである。

表 37 絶縁紙の各状態における強度

	試験 紙テープ 方向	油 浸	乾 燥	未乾燥 (R.H. 86%)
引張強さ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	縦	13.98	12.24	12.94
	横	6.21	5.22	5.64
伸 (%)	縦	1.74	1.67	3.21
	横	2.73	3.07	10.17

未乾燥紙（生紙）は水分多く、紙厚も大となつていて積層条件が異なるので別としても、乾紙、油浸紙は紙の摩擦抵抗（既述 2 章 2.3.4 参照）強度ともほとんど同じであるにかかわらず大きな違いを示す。これについて筆者は紙の硬さ、残留応力等にもとづく見掛け上の摩擦抵抗の差により紙テープの相互移動が制限され圧縮時、伸張時とも大きな力が部分的に加わるためであると考えている。

前述の曲げ戻し時における挫屈皺の発生状況、および、前節の外部構造種類とうねり発生状態の関係についても同様な事が影響しており、乾紙は生紙、油浸紙よりも見掛け上の摩擦抵抗が大であり、曲げ戻し時絶縁紙自身および内部素線の元の位置への移動をさまたげる。

なお、含有水分を同じくする紙が浸油の有無により硬さを異にすることの理論的説明は未だ不十分である。

## 11.6 結 言

本章においてはスパイラル構造の曲げによる素線移動に関する問題を扱い、

撓線、絶縁層の曲げ戻し時の問題を主として研究した。ケーブルのうねりは多くの場合、曲げにより移動したスパイラル素線が元に戻らぬことから生ずることを

明らかにし、これについて解析を行った。またケーブルのうねりおよび曲

びの外側または内側に生ずる素線の局所曲リ（圧縮挫屈）が同一の現象であること、従つてその対策も同様に与へうることを述べた。これらにより従来定説がなく経験的に処理されていたうねりの問題に対し基本となる理論を得ることができた<sup>1</sup>。この理論は他の同心撚ケーブルにもそのまま利用し得ていゝる。また、絶縁層の曲げ戻しにおける挫屈皺は紙筒の見掛け上の摩擦が大きく影響していることを述べ、紙切の機構についても新しい見解を示した。

## ※12章 電力紙ケーブル外装に見られる金属スパイラルについて

### 12.1 緒 言

前章迄にケーブル導体、絶縁層、被覆のスパイラルとしての性質、パイプとしての性質について述べて来たが、ここではこれら分類を完成させる意味でケーブルを機械的に保護する外装の金属スパイラルについて略述し、当報告を終結させたい。

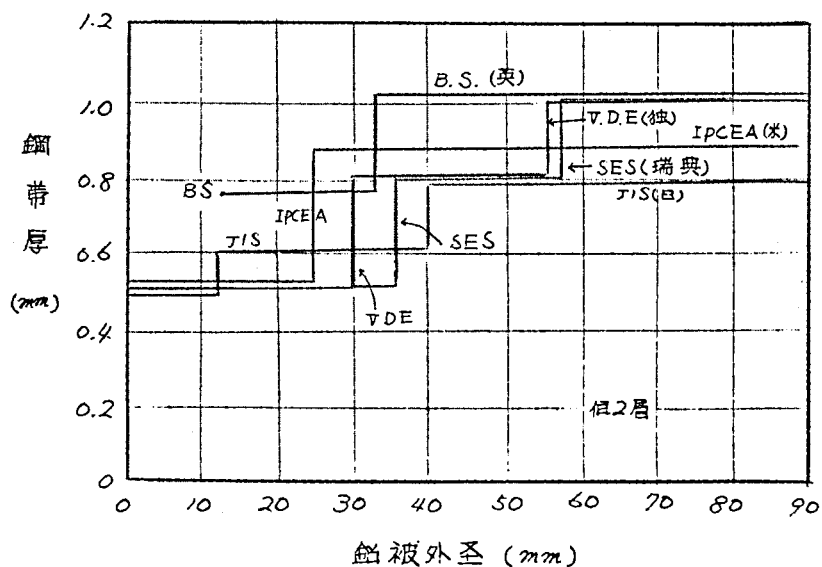
### 12.2 外傷に対する保護としての金属スパイラル

これの主たるものはもちろん鋼帯鍍装である。鋼帯鍍装の厂史は古く1852年 E. B. Bright 氏および C. B. Bright 氏が鋼帯鍍装の特許を取つて以来、3心ケーブルの30～50%は鋼帯が施されている。

しかしながらその効用は外傷といったような漠としたものを相手としているので研究対象とするには困難があり、その理論的な厚み、巾の極め手を見出すことは難かしい。

実際にも各国規格の鋼帯厚はオノフ2 図に示す如くまちまちであり、また巾および巻間隔も異なっており、規定してないものもある。

オノフ2 図 各国規格の鋼帯厚み



その呉鉄線外装も海底線、堅坑ケーブルのやうな張力に対するものを除き、外傷という呉では同様に明確なものはない。

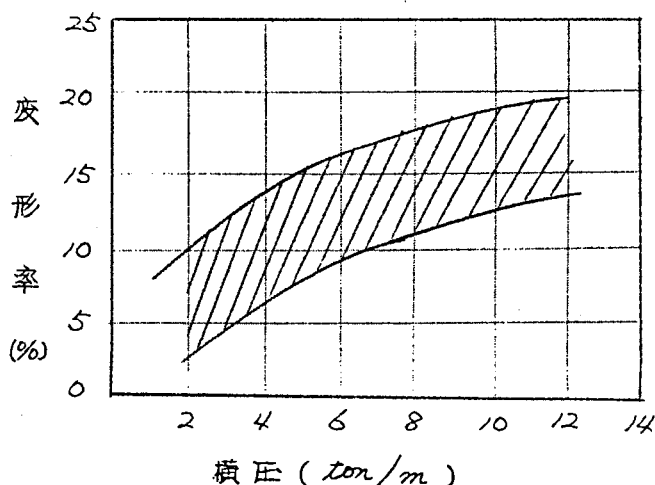
筆者は横圧に対するケーブルの変形に関し各種のケーブルについて多くの実験を繰り返したが、各構造の集合からなっているので複雑であり、かつ、案外な程再現性がとぼしく、バラツキも多くて見るべきものは得られなかった。しかしケーブルは横圧には割合つよく鋼帯鍍装、鉄線鍍装のいずれも靜的な横圧による圧潰に対してはそれ程大きな効果はないと考えられる。

それらの各種ケーブル代表例をオノフ三図に示す。

従つてケーブル直埋の場合、特にコンクリートトラフにより衝動的な外力を防ぎうるものは鋼帯鍍装の必要はないと考える。

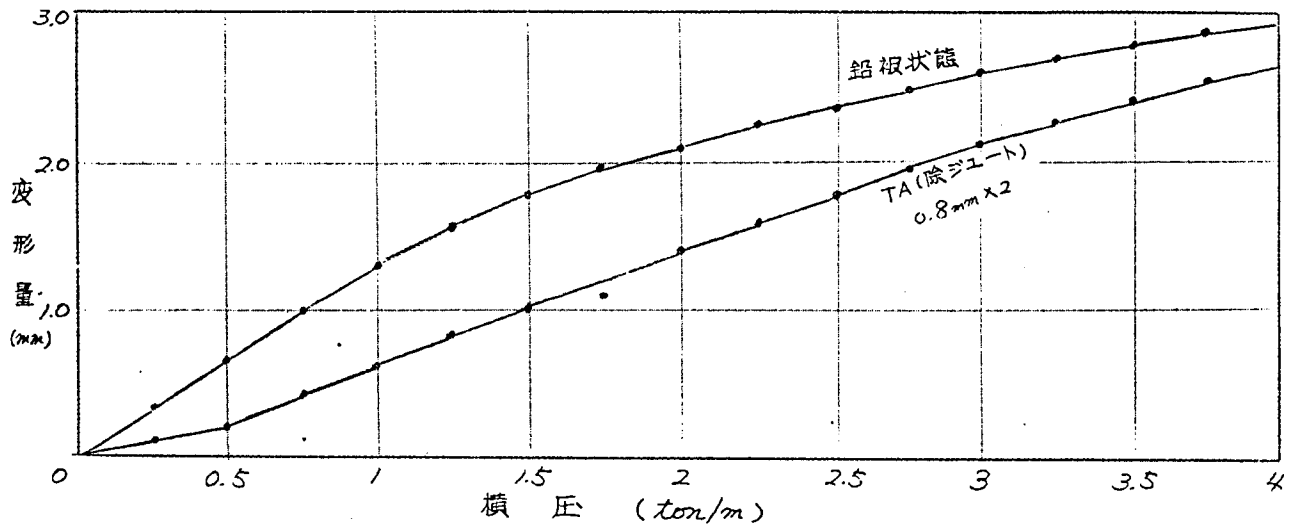
なお、上述の横圧変形実験の副産物として絶縁層の変形度の実験値が得られたが、絶縁層の横圧による変形率は紙厚にほとんど関係なくオノフ四図の如き結果を示した。(紙厚 2~8mm 単心)

オノフ四図 絶縁層の横圧による変形

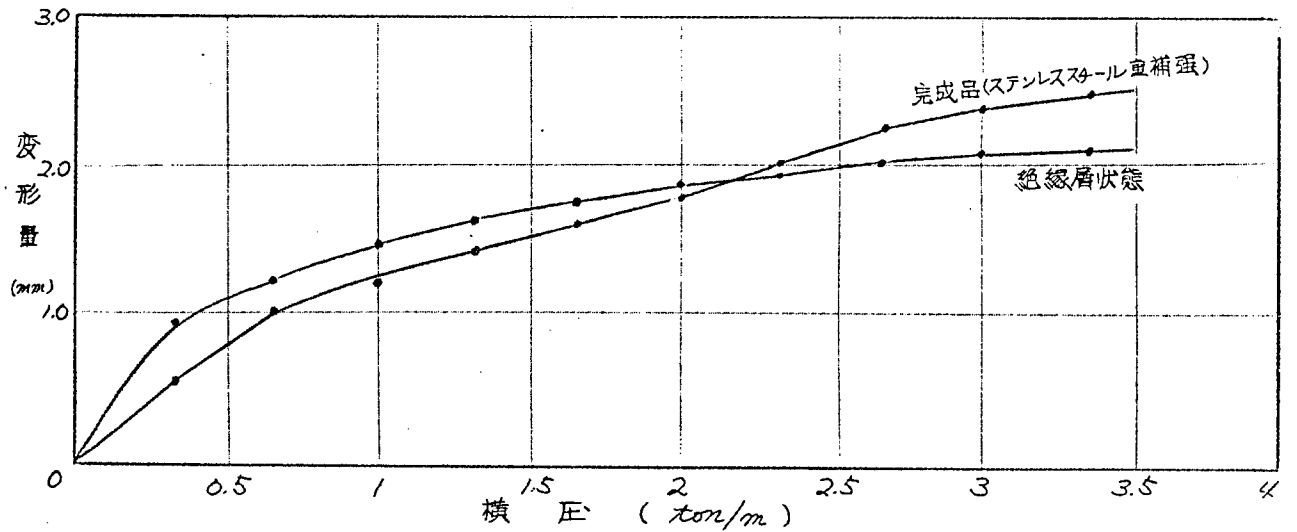


オノ73図 各種ケーブルの横圧による変形

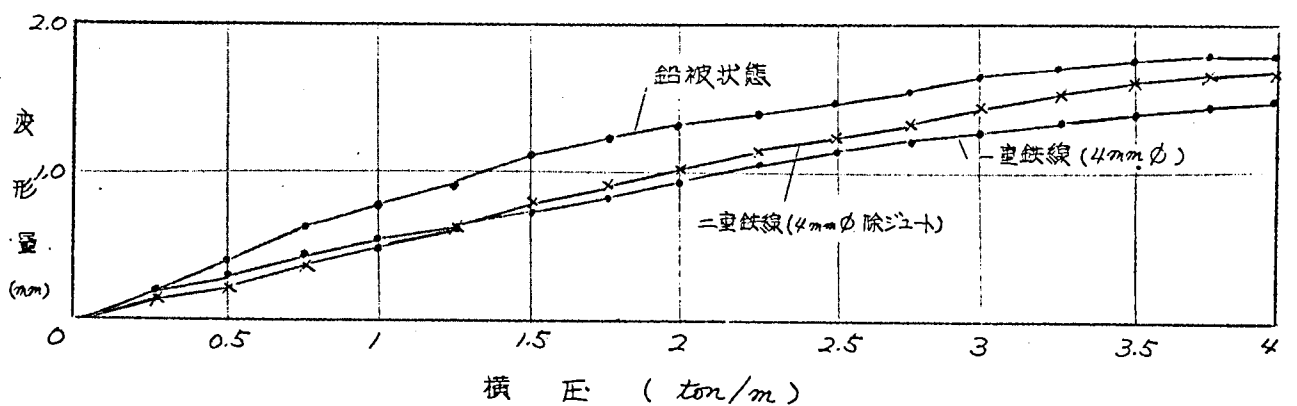
(a) 3KV 3×250mm<sup>2</sup> ベルト



(b) 275KV 1×200mm<sup>2</sup> OF



(c) 10KV 3×150mm<sup>2</sup> Hケーブル





### 12.3 張力および内圧に対する補強としての金属スパイラル

張力のかかるものとしては縦坑ケーブルが、内圧に關しては<sup>は</sup>OFケーブルが代表的なものである。

縦坑ケーブルの場合、全重量が鎧裝にかかるものとして十分な安全率をもつ鉄線丕および本数を送んでいるが、特に問題となるものはない。

OFケーブルの内圧に關しての研究は近年特に盛んであつた。以前は鉛にかゝる *hoop stress* を基に考察されていたが、現今ではどの研究も内圧はすべて補強金属テープが支持つとして進められており、材料、最下層補強帯の鉛へのくひこみ、補強帯の熔接法、軸方向補強等實際面での研究が行われ、 $15 \text{ kg/cm}^2$  を超すような高内圧鉛被ケーブルも實現されるようになった。

この補強テープに關する理論も一般に行われている理論と変るところもないので省略する。

### 12.4 結 言

以上、電力紙ケーブルのスパイラル構造、パイプ構造の研究報告を完了させるため、残されたケーブル外装スパイラルについて簡単に述べた。

外装スパイラルの横圧に対する効果は常識的に考えられているよりも少い。従つてコンクリート・トラフ埋設のものは鋼帶鎧裝は不要であると考え、他には特に得られたものはない。

## 第13章 総 括

本論文においては電力紙ケーブルの構造に関し総合的な研究を行った。

従来、この分野は有力な研究手段を欠き、個々の問題についてその都度検討が行われることが多かったが、筆者は、ケーブルは長尺物構造としてのパイプ構造とスパイラル構造の組合せであるとする新しい観点に立つて、これを分類し体系づけた。

これにより各パイプ構造、各スパイラル構造毎に実用上の問題をとらえ、主として実験による基礎的研究を行った。

これらにより基礎研究が未完成のため対策が立たず、あるいは対策を施しても理論的裏付けが不明のまま経験的に処理されることの多かったこの分野において、必要なる基礎特性の把握、問題の原因究明をなし実際面に役立たせることができたと考えられる。

以下これら研究報告の成果について述べる。

第1章は当論文の研究方針を述べ、第2章より第6章にはケーブルを構成する各パイプ構造が曲げ、捻り、外圧等を受けた場合の現象に関する研究を報告し、第7章より第12章にわたっては導体を主とするスパイラル構造の性質について論じた。

各章別にその内容を詳細に説明すれば、つぎの如くである。

第1章は電力紙ケーブル発達の歴史について構造を中心に概説し、ケーブル構造の特徴および問題点を述べ当論文の研究方針を説明した。すなわち、ケーブルは長尺物として製造、布設、使用に適する如く発達して来ているので、その構造はパイプ構造、スパイラル構造の組合せである。電力紙ケーブルは、両構造とも種類材質が多様多様で珍しい存在であるが、これらは長尺物である

ため、必然的に曲げ、捻り等各種の外力を受ける。本論文では上述の分類によりこれら外力を受ける場合の各ケーブル構造およびその組合せの性質につき研究を行うことを説明した。

以上分類、研究方法を述べ本報告の序章とした。

第2章は電力紙ケーブルに見られる円筒殻の曲げについて等方性円筒、異方性円筒、積層円筒に分け、各々の性質につき論じた。

曲げの問題はケーブル取扱いの主要素となるものであり、最も重要である。

等方性円筒ではケーブル被覆である鉛円筒、アルミ円筒を対象とした。

ケーブル鉛被は曲げにより皺を発生し、亀裂を生ずる元となる。本章は鉛被の軸方向圧縮挫屈と曲げによる挫屈皺との関係を中心に説明した。

軸方向圧縮実験では各種材料円筒について弾性域、塑性域を含め挫屈歪による電力紙ケーブル以外で弾性域挫屈を起す様な薄い金箔帯円筒を有する整理により広範囲にわたり相関が得られた。この関係はケーブルの捲取ドラム歪決定等に應用されており、後述の積層円筒の特性研究の基礎となる。

被覆の軸方向圧縮挫屈と曲げの挫屈皺との関係は主として通信ケーブルについて研究されて来たが、従来の発表は圧縮挫屈歪と曲げ挫屈歪を直接関連させた為、コアの存在及曲げ回数との関係を説明するのに無理がある事を述べ、これにつき検討した。また、アルミ被は鉛被より挫屈しやすいが、主として曲げ方法によることをのべ、アルミ被挫屈防止に対する一指針を与えた。

異方性円筒の曲げに關しては分類の意味を含め簡単に記述した。

つぎに絶縁層は異方性円筒ではあるが積層円筒として別に取扱った。

絶縁層は曲げにより皺を生じ電気特性を損ずる。筆者は絶縁層が積層条件のよい紙テープの集合からなることからパイプとしての性質を持つべきであると考え、研究を行った結果、絶縁層の皺もケーブル鉛被と同じくパイプの挫屈の際と同様の状況を生ずることを見出した。

こゝでは未乾燥紙、乾紙、油浸紙の各絶縁層円筒につき軸方向圧縮試験、心

連

線を有する場合の特性、曲げ挫屈との関係性等基礎的なものから研究を行った。

これにより未乾燥紙においてのみ挫屈問題の存在する理由を検討した。

また、従来国内外とも経験のみに頼つて未挫屈防止問題につき、その理論を  
究明して、この特性が主として積層条件によることを説明した。さらにそれ  
に基づく具体的対策を示すことにより紙捲方法改善に資することができた。また、  
同時にケーブル許容曲げ半径算出の基準を与えた。

これら研究は絶縁層の機械的特性に対する 今後の

研究の足掛りになるものと考ええる。なお、この問題の表面化する事を学会で発表  
して来たが、昨今ケーブル電圧の高圧化とともに急にクローズ・アップされて来ている。

第3章では電力紙ケーブルに見られる円筒殻の換りについて、曲げ同様等方  
性、異方性、積層の各円筒毎に研究を行った。ケーブルは曲げと共に常に換り  
をうけるので、この特性もまた、重要である。

等方性円筒の換りは鉛被についてのみ論じた。

鉛被は楕円断面化する型の換り挫屈形式をとり、内部心により挫屈限界の向上  
することを述べた。

また、電力紙ケーブル鉛被の換りは挫  
屈限界が高く曲げ変形を助長させること以外には、これによりケーブルの取扱  
いを制限されないことを説明し、ケーブルに必要な基礎特性を明らかにした。

異方性円筒の換りは簡単にふれたのみである。

つぎに、積層円筒としての絶縁層の換りにつき研究を行った。

ケーブル絶縁層の換りは特殊の場合のほかは障害として現われず、なじみも  
少ないのであまり知られていない。しかし海底ケーブルの如き場合は大きな問題と  
なり、また、挫屈を生じ易い扇型絶縁層の基本となるものであるからこの特  
性も重要である。

まず未乾燥紙、油浸紙よりなる絶縁層円筒およびこれらが心線を有する場合

の挟り特性につき実験を行い、それぞれ軸方向圧縮と全く対応する結果を得た。未乾紙の場合は次章扇形ケーブルの挟り研究の基礎となるものである。曲げの時と同じく未乾燥紙の場合は心線の存在により挫屈歪は向上しないが、油浸紙円筒は心線の存在により特性が向上する。さらに鉛被を有する時は挟り挫屈により特異な皺を生じ、これにより従来解明出来なかつた海底ケーブル事故状況の一つを再現した。また、油浸絶縁層の挟りは曲げと異なり、挫屈限界は、鉛被より小さく、これにより電力紙ケーブルの挟りの大きさが制限されることを示した。また、この許容挟り量を明らかにすることにより燃合せピッチ変換作業等の基礎資料を与えた。

第4章は電力紙ケーブルに見られる非円形断面筒殻である扇形絶縁層について研究を行った。扇形ケーブルは燃合せ時挫屈皺を生じ易く問題となる。ここでは実用面を考へ、未乾燥紙のみにつき扇形筒の曲げ、挟りの研究を行った。両者とも円筒の場合に比し挫屈特性は悪く、それぞれ約 $1/2$ 、約 $3/4$ の挫屈歪を有することが判明した。挟りの場合紙巻方向、挟り方向、燃線の存在、燃線方向、予燃の有無等による影響は少い。挫屈特性向上には積層条件向上と形状を円形に近づけることが有効である。以上により燃合せ時に於ける扇形絶縁層の挫屈防止に關する基礎資料が得られた。

第5章は外圧を受ける電力紙ケーブル円筒殻の変形について論じた。

電力紙ケーブルでは単心ケーブルは特別の場合の他、圧潰の危険のないことを説明した。しかし、3心ケーブルでは圧潰の恐れがあるので、高温時の特性、補強帯の影響、内部コアの効果につき実験を行い、圧潰防止の基準を得ることができ、実際面に利用できた。

カ6章においては

電力紙ケーブル

ルに生ずる内部固有応力関係の挫屈について紹介した。紙捲時の調湿は積層条件を向上させるほか、湿気応力挫屈の可逆性利用により挫屈防止に対しては二重の効果がある。また、膨潤によるもの、熱によるものも分類上の意味を含め説明した。

カ7章は、電力紙ケーブルに見られるスパイラル構造の種類および実用上必要なスパイラル加工の理論につき述べた。すなわち燃線における素線嵌り角の誘導、限界ピッチの計算、それと実用的意義との関係につき説明し、また燃る捲きつける、といった用語の意味を限界ピッチとの関連において明確にした。これらにより次章以降のスパイラル構造研究に対する序章をも兼ねた。

カ8章は電力紙ケーブルに用いる燃線スパイラルの性質について曲げ特性、嵌り特性の両者を論じた。また特殊燃線の機械的特性をも研究した。

曲げ特性の項においては合理的な燃線構成の基礎資料をうるため、主として可撓性の研究を行つた。可撓性の尺度としては多くの提案があるが、筆者は電力紙ケーブルの場合、他の構成とのバランスをとつて可撓性を送るべきであるとの見地から曲げ剛性の値そのものによることが最も好都合なることを提議した。これは現在電力ケーブル界で一般に採用されるようになった。また、測定法については過去に発表されたものを一通り実験検討した末、最も単純な梁の荷重一撓み曲線による方法を推奨し、これにより可撓性の測定が現在我国で行われている。

また、線間摩擦を無視した蔓捲バネ理論による計算値と実際値との比較により、この計算の有用なことを述べ、かつ、ケーブル導体曲げ剛性算出の実用式を導いた。この実用式は電力紙ケーブル関係者に利用されている。

燃線の嵌り特性は重要な基礎特性の一つであり、また、他のスパイラル構造

の特性の基本となる。本節では換り易さの尺度として曲げ同様換り剛性の値そのものをとり、蔓捲バネ理論と比較した結果、層間圧合のない場合は有用であることを示した。

また、交互捲線、同方向捲線の右換り、左換り時の各層換り剛性、換りモーメントを比較することにより線間摩擦、層間圧合の大きさを明らかにした。捲線加工で生じた残留応力によるモーメントの大きさは実験によれば約2割であつた。また、扇形捲線についても測定を行つた。

特殊捲線については圧縮導体、セグメンタル素線捲り導体の両者を扱つた。これは圧縮導体およびセグメンタル素線捲り導体採用の機械的特性の低下を懸念されたので、その普及を円滑ならしめるため研究を行つたものである。圧縮導体は外径換算による可撓度は低下するが、圧縮成型のため曲げ剛性の大きくなることはない。換り特性もほぼ同様である。いずれの時も普通捲線に比し比例限度は高い。なお、圧縮度と共に捲線としての抗張力は増すが伸びは急激に低下する。

セグメンタル素線捲り導体の時は曲げ、換りとも剛性は大となり比例限度も高いが、后章に示す如くケーブル全体にとつては小さい値である。

第9章においては前章に引続き合理的導体構成、導体種類およびケーブル構成の選定につき基礎資料をうるため、電力紙ケーブルコアの各構成が機械的特性上で占める役割につき研究した。ケーブルの曲げにおいてはその曲げ剛性の大部分を鉛が占め、絶縁層はこれについて大きく、導体の占める割合は意外に少いことが判明した。また、換りにおいては油浸紙の占める割合が相当大きなものであり、一方導体は曲げの場合より大きい。サイズによつては、なほ相当小さいものであることが明らかとなつた。

これらにより導体構成改良の基礎資料が得られた。また、今迄常識的に油浸

絶縁層は潤滑剤であり機械的特性の上では無視できるとした説もあつたが、これの誤りであることを明らかにした。

オ10章は電力紙ケーブル絶縁層のスパイラルとしての性質について扱った。絶縁層のパイプとしての性質はオ2章～オ4章に述べたが、絶縁層はまたスパイラルとしての性質をも保有しているのでこれにつき説明し、絶縁層の特性を理解する一助とした。また古くから論ぜられている紙巻の交互巻、同方向巻の優劣は決り特性には多少の差があるが、曲げ特性は同様であり、他の面を考慮すれば交互巻が良いと考えられる。

オ11章では、スパイラル構造の曲げによる素線移動に関する問題を扱い、燃線、絶縁層の曲げ戻しの問題を主体に考察を進めた。ケーブルのうねりは曲げにより移動したスパイラル素線が元に戻らぬことから生ずることを明らかにし、これについて解析を行つた。またケーブルのうねり、および、曲げの外側または内側に生ずる素線の局所曲り（圧縮挫屈）が、いずれも同一の現象であること、従つてその対策も同様に与えうることを述べた。

これらにより従来定説がなく、経験的に処理されていた、うねりの問題に対し基本となる理論を得ることができた。また、この理論および対策は他の同心巻ケーブルにもそのまま利用されている。また、絶縁層の曲げ戻しにおける挫屈は紙向の見掛上の摩擦が大きく影響していること述べ、紙切れの機構についても新しい見解を示した。

オ12章は電力紙ケーブルの外装スパイラルについて、横圧、張力、内圧等を受ける場合につき略述した。外装スパイラルの横圧に対する効果は常識的に考えられているものよりは少い。従つてコンクリート・トラフ埋設のものは鋼帯鎧



装は不要であると考える。

以上当論文の成果につき述べた。勿論この研究分野は非常に広く、未解決の問題は多いが、将来の研究の足掛りとなれば幸いである。特に絶縁層関係の研究は非常に少かったが、この報告が一つの糸口になるのではないかと思ふ。

また、当研究においては長尺物としての観点から電力紙ケーブルを新しい形式に分類し、体系づけて観察したが、このような考察方法は他の品種のケーブルにも応用されるものと考える。

以 上

## 参 考 文 献

- (1) S. Timoshenko      *Theory of Elasticity*
- (2) 長桂研究委員会      弾性安定要覧
- (3) 鈴木 二郎      ケーブル鉛被の機械的的特性に関する実験的研究  
(古河電工時報) 昭 26
- (4) F.O. Wollaston 他      *Aluminium-Sheathed Type SA Gas  
Pressurized 69 KV Cable for  
Vancouver (TAIEE 1953)*
- (5) A. Robertson      *The Strength of Tubular Struts  
R & M. (1927)*
- (6) E.E. Lundquist      *Strength Tests of Thin-walled  
Duralumin Cylinder in Compression  
N. A. C. A. T. R. (1933)*
- (7) J.W. Geckeler      *Plastisches Knicken der Wandung von  
Hohlzylindern und einige andere  
Flattungserscheinungen an Schalen und  
Bleichen. Z. A. M. M. (1928)*
- (8) 瀬谷 巖      波板に関する諸問題  
(電芸肉円筒の弾性安定に就て)  
航空学会誌 昭 15
- (9) Th. V. Kármán 他      *The Buckling of Thin Cylindrical Shells  
under Axial Compression Jour. Aero Sci.  
(1941)*
- (10) L.G. Brazier      *On the Flexure of Thin Cylindrical  
Shells and Other Thin Sections R. & M. 1927*
- (11) 水 井 和 夫      アルミ-シース通信ケーブルの機械的性質に関する  
研究(その一) 古河電工報告 昭 26. 5
- (12) British Standard      480 Pt. II (1954)
- (13) W. Flügge      *Statik und Dynamik der Schalen (1934)*

- (14) 池 田 健 内圧又は外圧を受ける炭肉円筒の曲げ  
航空学会誌 昭 15
- (15) 日下部 金子 富田 動力ケーブル誘電体の機械的特性  
電気三学会連大 昭 29
- (16) 日下部 金子 富田 動力ケーブル誘電体の機械的特性に関する研究  
カー報(屈曲による挫屈について)  
古河電工報告 昭 28. 4
- (17) 日下部 金子 富田 動力ケーブル誘電体の機械的特性に関する研究  
カー報(曲げに依る挫屈 その二)  
古河電工報告 昭 28. 8
- (18) *Dji-Djuän Dshou* *Luftfahrt - Forschung (1935)*
- (19) 中 野 英三郎 他 波付アルミ被ケーブルについて  
昭 32 年電気学会支部大会
- (20) 林 毅 直交異方性円筒殻の挫屈について  
造船協会講演会 昭 22
- (21) *Dunsheath* *High Voltage Cables*
- (22) *A. N. Arman* *300 KV Oil-Filled Cable for Aluminium  
Company of Canada  
Power Apparatus & System Oct. 1954*
- (23) *K. S. Wyatt* 他 *Mechanical Uniformity of paper  
Insulated Cables  
T.A.I.E.E March 1938 Vol. 57*
- (24) *Simplex wire & Cable Co.* *Bulletin No. 109  
Simplex Impregnated Paper Insulation for  
Power Transmission Cable Oct. 1949*

- (25) *Anaconda wire & Cable Company* *Paper Insulated Power Cable*
- (26) *L. Domenach* 他 *Very Thin Tapes Promise Reduction in Cable Insulation Thickness El. World March 1950*
- (27) 日下部 金子 富田 *動力ケーブル誘電体の機械的性質の研究(2)*  
電気学会 昭29 秋
- (28) 日下部 金子 富田 *ケーブル誘電体の機械的性質の研究 才3報*  
( 挟り挫屈 その一 )  
古河電工報告 昭28. 10
- (29) 日下部 金子 富田 *ケーブル誘電体の機械的性質の研究 才4報*  
( 挟り挫屈 その二 )  
古河電工報告 昭28. 11
- (30) *E. Schwerin* *Die Torsionstabilität des dünnwandigen Rohres.*  
R. I. C. A. M Delft (1924)
- (31) *L. H. Donnell* *Stability of Thin-walled Tubes under Torsion* *N. A. C. A. T. R. No. 479*  
*Washington (1933)*
- (32) *E. E. Lundquist* *Strength Tests of Thin-walled Duralumin Cylinders in Torsion*  
*N. A. C. A. Tech. Note No. 427 (1932)*
- (33) *F. J. Bridget* 他 *Some new Experiments on Buckling of Thin-wall Constructions.*  
*Trans A S. M. E Vol 56 No. 8 (1934)*

- (34) O.S. Heck 他 *Formulas & Methods of Calculation of the Strength of Plate & Shell Structures in Aeroplane Construction*  
J. R. A. S Vol 40 1936  
(訳文 — 造船協会雑誌 昭 12)
- (35) W. Ballerstedt 他 *Versuche über die Festigkeit dünner unversteifer Zylinder unter Schub- und Längskräften*  
Lufo. Bd. 13 Nr 9 (1936)
- (36) 林 毅 直交異方性円筒殻の捩屈について  
造船協会講演会 昭 22
- (37) 井 上 眞 六 他 合板円筒の強さについて  
日本航空学会誌 9巻 91号 (1942)
- (38) 桐ヶ谷 弘 昌 他 明石海底ケーブルの特殊試験に就いて  
古河電工報告 昭 22
- (39) O. S. Heck *Über die Stabilität orthotroper elliptischer Zylinderschalen bei reiner Biegung*  
Lufo Bd. 14 (1937)
- (40) 遊 谷 巖 炭肉筒の弾性安定について  
日本航空学会誌 58号 (昭 15)
- (41) 池 田 健 挟りを受ける三角形炭肉中空筒の破損について  
日本航空学会誌 79号 (昭 16)
- (42) 池 田 健 挟りを受ける非円形炭肉中空筒の破損について  
日本航空学会誌 61号 (昭 15)

- (43) 遊 谷 巖 蒸肉角壊の埃りに生ずる不安定現象の限界に就  
て 日本航空学会誌 76号 (昭16)
- (44) 電気通信研究所 ケーブル被覆委員会資料(オ2分冊)  
1955 12月
- (45) R. V. Southwell *On the Collapse of Tubes by External  
Pressure Part III Phil. Mag. Series 6.  
Vol. 29 1915*
- (46) 元 木 一 郎 海底電話ケーブル鉛被の補強方法に就いて  
古河電工 電線第3号
- (47) D. P. Sayers 他 *The possibilities of a Cross-channel  
power link between the British  
& French supply system*  
P. I. E. E. April 1954
- (48) 橋 本 平 他 蒸気連続加硫によるケーブル鉛被の圧潰とその  
対策 古河電工報告 昭27
- (49) 宮 部 宏 材料の湿気的性能  
早稻田大学理工学研究所報告オ1輯 昭19
- (50) 小 林 参 ネオフレンケーブルの腐蝕について  
電設工業 昭34. 2
- (51) C. J. Beaver *Insulated Electric Cables  
Ernest Benn Limited*
- (52) 今 井 藤 男 限界ピッチの計算に就いて  
古河電工報告 昭31
- (53) 日下部 浅野 富田 燃線の可燃性の研究 オ1報  
古河電工報告 昭28. 2

- (54) 日下部 浅野 富田 燃線の可撓性の研究 ㊦2報  
古河電工報告 昭28. 4
- (55) 日下部 浅野 富田 燃線の可撓性の研究 ㊦3報  
(可撓性の定義及各種測定法)  
古河電工報告 昭28. 4
- (56) 元 木 一 郎 他 柔軟性を定量的に表はす方法に就いて  
古河電工報告 昭15.
- (57) 井 上 次 男 他 燃線導体の研究 ㊦一報  
昭28春 電 気 学 会
- (58) S. Owada *On the Flexibility of Cable*  
*Journal of the College of Arts and*  
*Science, Chiba Univ Vol 1. No. 1*  
*march 1951*
- (59) 磯 部 務 円環法による金屈線の弾性係数の測定  
古河電工時報 ㊦7号
- (60) 平 野 慎 吾 円環法を利用したACSRの可撓性の測定  
理化学研究所報告 昭25
- (61) 高 橋 貞 次 主幹ケーブルに関する諸問題  
古河電工時報 ㊦10号
- (62) 上 野 勲 鋼索の相当曲げ及捩り強さの算出並にこれを応  
用せる巻胴巻付時の鋼索素線応力の計算につい  
て 運輸技研報告 Vol. 1 No. 2
- (63) S. Timoshenko *Strength of materials* 1930
- (64) E. Utsumi *Buckling of a long herical*  
(内海英治) *spring under the compressive load*  
機械学会誌 28巻 (大正14年 9月)
- (65) 会 田 俊 夫 他 鋼索の曲げ易さ(可撓性)について  
日本鋁業会誌 ㊦68巻

- (66) 会 田 俊 夫 他 . 鋼索の機械的特性に及ぼすロープ、ピッチの影響 (オ2報)  
水曜会誌 オ12巻 5号
- (67) 日下部 浅野 富田 撚線の挽り特性の研究  
古河電工報告 昭28. 6
- (68) 日下部 浅野 富田 圧縮導体の研究 オ4報 (機械的性質その一)  
古河電工報告 昭28. 4
- (69) 日下部 浅野 富田 圧縮導体の研究 オ5報 (機械的性質その二)  
古河電工報告 昭28. 7
- (70) 日下部 浅野 セグメンタル導体の機械的特性  
古河電工報告 昭29. 7
- (71) 日下部 浅野 他 成型素線撚り導体によるO.Fケーブルについて  
電気三学会 昭29
- (72) 副 島 為 安 他 同方向撚と交互撚のソリットケーブル比較試験  
古河電工報告 昭23. 2
- (73) 日下部 悦 二 同心撚線のうねりに関する一考察  
古河電工報告 昭34. 3
- (74) *Emanuelli* *I Cavi ad alta tensione*
- (75) 駒 沢 浩 一 多芯ケーブルの捻回、屈曲の際に於ける線芯の延伸及移動状況  
古河電工報告 昭13. 4
- (76) 上 野 勲 *Strand 及び Rope のうねり生成に就いて*  
運輸技研報告 Vol 3 No. 6



## 謝

## 辞

本論文は京都大学教授（電気教室）大久保達郎博士の御指導によつて成った。  
記して感謝の誠を表したい。

また京大名誉教授阿部 清博士、京大教授（鉦山）会田俊夫博士、東大助教授（船舶）山本善之博士、暹研上野 勲氏、ならびに、当社 渡辺一雄横電所長、塚本 勉 副所長、佐藤大三氏、鈴木二郎博士、橋本 平氏、高橋真次博士、柴田良紀氏、滝山哲二氏、井上次男氏、金子 進氏、森 昌太郎氏、浅野嘉正氏、富田秋夫氏の方々に御激励、御助力を頂いたことを述べ、御礼の言葉にかえたい。